

LAPORAN AKHIR
HIBAH PENELITIAN KOMPETITIF SESUAI PRIORITAS
NASIONAL BATCH-I
Tahun Anggaran 2009



1000458

Judul Penelitian:
Perbaikan Zona Potensi Longsor
Dengan Metode Elektrochemical Injection

Ketua Tim Peneliti:
Dr. rer. nat. **Arief Rachmansyah**

Penelitian ini dibiayai oleh APBN Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi Departemen Pendidikan Nasional melalui DIPA No, 0868.0/023-04-1/2009 tanggal 31 Desember 2008

UNIVERSITAS BRAWIJAYA
NOPEMBER, 2039

IDENTITAS LAPORAN

Judul

Perbaikan Zona Potensi Longsor dengan Metode *Electrochemical Injection*

2. Tim Peneliti

2.1 Ketua Tim

- | | |
|------------------------------------|---|
| a. Nama Lengkap | : Dr. rer. nat. Arief Rachmansyah |
| b. Jabatan Fungsional/Golongan | : Lektor/ IIIb |
| c. NIP | : 19660420 199303 1 002 |
| d. Fakultas/Sekolah | : Teknik |
| e. Jurusan/Kelompok Keahlian | : Teknik Sipil / Geoteknik |
| f. Alamat Kantor/Telp/Fax/E-mail | : dl. Mayjend Haryono 167 Malang, 0341-553286 |
| g. Alamat Rumah/Telp/Fax/HP/E-mail | : Jl. Pum Malu 18 Malang, Tel/Fax. 0341-402440, 08123168037, arieftub@yahoo.com |

Anggota Tim:

No	Nama dan Gelar Akademik	Bidang Keahlian	Unit Kerja/ Lembaga	Alokasi Waktu	
				Jam/mg	bulan
1.	Rini Nur Hasanah. PhD.	Teknik Energi Listrik	Fakultas Teknik	5	6
2.	Bambang Poerwadi, Ir. MSi.	Kimia Anorganik	Fakultas MIPA	5	4
3.	Adi Susilo. PhD	Geofisika	Fakultas MIPA	5	4
4.	Dr. Eng. Yulvi Zaika	Teknik Sipil	Fakultas Teknik	5	6

- | | | |
|----|------------------------------|----------------------------------|
| 3. | Jangka waktu penelitian | : 2 tahun |
| 4. | Total biaya yang diusulkan | : Rp. 190.000.000 |
| 5. | Biaya yang diusulkan tahun 1 | : Rp. 90.000.000. |
| 6. | Bidang Penelitian | : Mitigasi dan Manajemen Bencana |

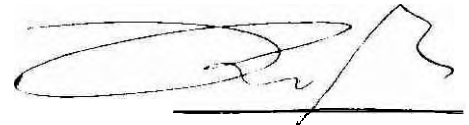
Mengetahui
Ketua Pusat Studi
Kebumihan dan Mitigasi Bencana

a.n.



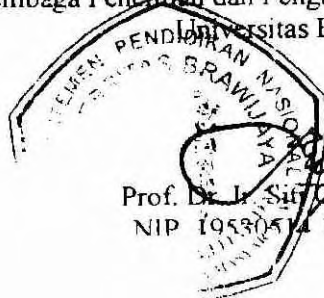
Prof Dr. Ir Bambang Guritno
NIP

Malang, Nopember 2009
Ketua Tim Peneliti



Dr. rer. nat. Arief Rachmansyah
NIP. 19660420.199303 1 002

Mengetahui,
Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat
Universitas Brawijaya



Prof. Dr. Ir. Sutopo Zaimi, MS.
NIP 19530514 198002 2 001

RINGKASAN

Longsoran adalah salah satu jenis bencana yang sering dijumpai di Indonesia, baik skala kecil maupun besar. Longsoran mudah terjadi pada tanah kohesif atau berbutir halus, dan pada saat jenuh air, karena pada saat tersebut nilai kuat geser dan kohesinya ferendah. Upaya pencegahan longsoran dapat dilakukan dengan membangun dinding penahan atau dengan geotekstil, namun metode ini masih dianggap terlalu mahal. Untuk itu perlu dicari metode lain yang mudah dilakukan dan berbiaya rendah.

Tujuan utama penelitian ini adalah mencari alternatif perbaikan tanah pada lereng asli atau timbunan tanah yang berpotensi longsor. Tujuan mendasar dari penelitian ini adalah memperbaiki sifat tanah kohesif, terutama meningkatkan kuat geser tanah (*internal friction force*) di tempat (*in situ*). Manfaat dari penelitian ini adalah tersedianya metode dan teknologi perbaikan tanah berbutir halus yang dapat dilakukan di tempat (*insitu*) dan berbiaya murah.

Dalam penelitian laboratorium ini perbaikan tanah dilakukan dengan memanfaatkan fenomena elektrokinetik. Fenomena alektrokinetik menjelaskan adanya hubungan antara aliran air (hidarulik gradient) dengan aliran listrik (*potensial gradient*) pertama kali ditemukan oleh Reuss tahun 1809. Dalam bidang geoteknik fenomena ini pertama kali dimanfaatkan oleh Casagrande tahun 1952 untuk **menurunkan** kandungan air (dewatering) pada tanah berbutir halus, sehingga kuat gesernya meningkat.

Penelitian dilakukan dengan melakukan eksperimen laboratorium dengan skala percontohan. Dalam model test dilakan injeksi larutan kimia yang dapat berfungsi semen atau mengurangi sifat tanah lempung dalam menyerap air. Pa& percobaan kali ini digunakan tanah lempung kaolin, dengan pertimbangan bahwa jenis tanah lempung ini kemampuan serapan airnya paling rendah. Sebelum dilakukan eksperimen contoh tanah lempung diuji beberapa sifat fisiknya.

Jenis larutan kimia yang digunakan antara lain CaCl_2 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Untuk inengetahui keberhasilan metode perbaikan tanah dilakukan dengan membandingkan sifat mekanis tanah sebelum dan sesudah dilakukan injeksi elektrokimia. Metode pengujian mengikuti Standar Nasional Indonesia yang sesuai.

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari percobaan yang telah dilakukan antara lain:

- Injeksi elektrokimia dengan larutan CaCl_2 dan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dapat meningkatkan kuat geser tanah lempung kaolin
- Peningkatan kuat geser setelah injeksi elektrokimia dengan CaCl_2 lebih tinggi dibandingkan dengan $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
- Anoda untuk injeksi larutan CaCl_2 lebih cepat korosif dibandingkan dengan untuk injeksi larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$
- Model test perlu beberapa perbaikan, terutama proses dewatering pada tanah setelah diinjeksi elektrokimia.

1. LATAR BELAKANG MASALAH

Longsoran adalah salah satu jenis bencana yang sering dijumpai di Indonesia, baik skala kecil maupun besar. Upaya penanggulangan longsoran biasanya dilakukan setelah terjadi, meskipun gejala longsoran dapat diketahui sebelum kejadian. Longsoran mudah terjadi pada tanah kohesif atau berbutir halus, dan pada saat jenuh air, karena pada saat tersebut nilai kuat geser dan kohesinya terendah. Upaya pencegahan logsoran dapat dilakukan dengan membangun dinding penahan atau dengan geotekstil, namun metode ini masih dianggap terlalu mahal. Untuk itu perlu dicari metode lain yang mudah dilakukan dan berbiaya rendah.

Fenomena alektrokinetik yang menjelaskan hubungan antara aliran air dengan aliran listrik pertama kali ditemukan oleh Reuss tahun 1809. Dalam bidang geoteknik fenomena ini pertama kali dimanfaatkan oleh Casagrande tahun 1952 untuk menurunkan kandungan air (dewatering) pada tanah berbutir halus, sehingga kuat gesernya meningkat. Sejak itu metode ini cukup luas digunakan di beberapa negara Eropah daratan untuk perbaikan tanah berbutir halus. Pada dekade 1980an fenomena ini diaplikasikan dalam grouting elektrokimia untuk perbaikan timbunan tanah berbutir halus untuk keperluan transportasi tanpa harus merusak bangunan dan mengganggu kegiatan yang berlangsung di atasnya. Metode ini telah dimanfaatkan oleh beberapa ahli geoteknik di Jerman untuk mempercepat proses konsolidasi tanah dan memperbaiki tanah di bawah pondasi akibat penurunan air tanah atau pelarutan, dan kemungkinan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan stabilitas tanah agar potensi longsoran berkurang.

Elektrochemical injection adalah metode penyemenan material berbutir halus dengan memanfaatkan fenomena elektroosmosis, salah satu jenis dari fenomena alektrokinetik, yakni aliran zat yang dapat terpolarisasi sebagai akibat beda potensial, atau adanya arus listrik. Bedanya, metode ini memanfaatkan fenomena tersebut untuk mengalirkan cairan perekat (semen) agar tanah mempunyai kuat geser lebih tinggi.

Selama penerapan metode ini kendala utama yang dihadapi adalah proses korosi yang terjadi pada anoda. Beberapa upaya untuk menyempurnakan pelaksanaan metode ini telah dilakukan oleh beberapa peneliti, baik dari segi operasi maupun peralatan. Dalam dua dekade terakhir metode ini mulai dikaji lagi untuk membersihkan tanah tercemar oleh logam berat maupun bahan organik. Kajian untuk perbaikan dan perluasan aplikasi metode ini dalam bidang geoteknik dan geoenvironmental perlu dilakukan secara berkelanjutan.

2. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

Tujuan utama penelitian ini adalah mencari alternatif perbaikan tanah pada lereng asli atau timbunan tanah yang berpotensi longsor. Tujuan mendasar dari penelitian ini adalah memperbaiki sifat tanah kohesif, terutama meningkatkan kuat geser tanah (*internal friction force*) di tempat (*in situ*). Karena tanah kohesif mempunyai permeabilitas tinggi, maka penggunaan alat grouting yang bertekanan tinggi dapat mengganggu stabilitas lereng, sehingga diperlukan metode untuk menginjeksikan larutan semen atau bahan lain yang dapat berfungsi sebagai pengikat atau pelapis mineral lempung agar kemampuan menyerap airnya menurun.

Manfaat dari penelitian ini adalah tersedianya metode dan teknologi perbaikan tanah berbutir halus yang dapat dilakukan di tempat (*insitu*) dan berbiaya murah.

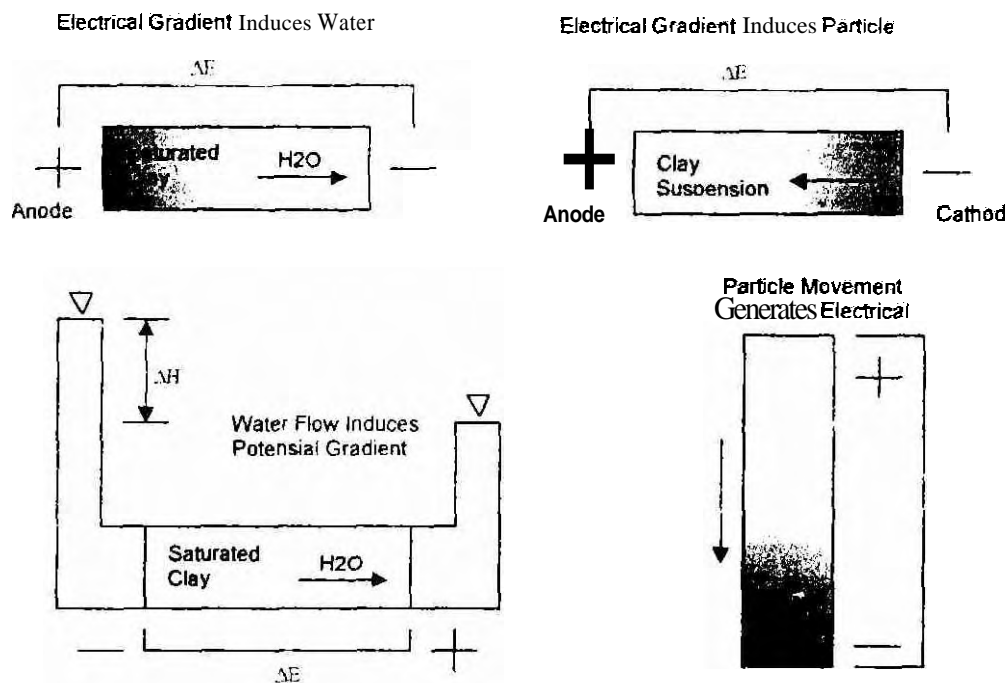
3. TINJAUAN PUSTAKA

3.1. Teori Dasar

Keberadaan fenomena elektrokinetik untuk mentransport air, partikel yang bermuatan dan ion bebas melalui tanah berbutir halus pertama kali diamati secara lengkap oleh Reuss pada tahun 1809. Kandungan air pada tanah berbutir halus merupakan sifat fisik yang sangat mendasar dan mempunyai pengaruh sangat besar pada kekuatan material. Pengontrolan air pada tanah berbutir halus, seperti lempung, menjadi tujuan utama, tetapi masalah yang melekat adalah rendahnya permeabilitas hidraulik dan tanah tersebut.

Hubungan antara aliran listrik dan air dan gradiennya pada material berbutir halus dikenal dengan fenomena elektrokinetik, dimana partikel bermuatan dapat terjadi kesetimbangan karena gerakan muatan listrik yang berlawanan. Fenomena elektrokinetik pada campuran air – dan tanah dapat dibedakan atas 4 macam, yakni:

- **Electroosmosis**, pergerakan air melalui matrik padat di bawah medan listrik
- **Electrophoresis**, pergerakan partikel suspensi melalui air pada medan listrik
- Streaming potential, medan listrik kecil dapat disebabkan oleh pergerakan air melalui matrik tanah
- Sedimentation or migration **potential**, medan listrik kecil disebabkan oleh pergerakan (sedimentasi) partikel padat melalui air, atau pergerakan kation dan anion pada medan listrik

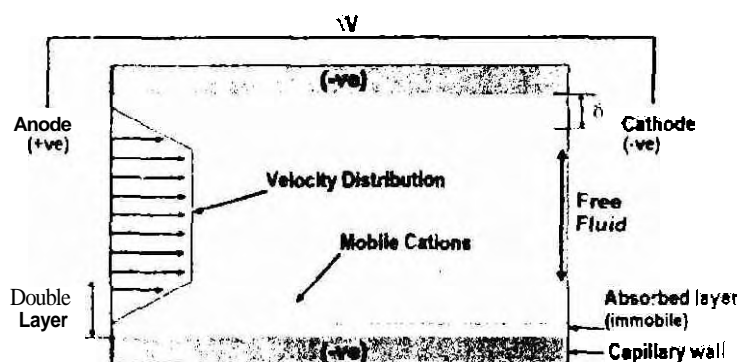


Gambar 1: Elektrokinetic phenomena, electroosmosis, electrophoresis, streaming potential and migration or sedimentation potential (clock wise), after Mitchell (1993)

Dari semua fenomena tersebut, elektroosmosis dan elektrophoresis merupakan fenomena yang paling relevan / terkait untuk aplikasi secara komersial dalam bidang Geoengineering dan Geoenvironmental. Elektroosmosis umumnya terjadi pada tanah, sedangkan kejadian elektrophoresis lebih mengarah pada limbah dan koloid. Batas antara kedua proses bersifat gradasi dan dapat dikaitkan dengan batas Atterberg.

When a D.C. voltage is applied across a wet soil mass, ion migration takes place. Positive ions (cations) are attracted to the cathode and repelled from the anode and negative ions (anions) are forced in the opposite direction. As the cations migrate along the porewater / solid boundary layer they drag with them their water of hydration and exert a viscous drag upon the free pore fluid around them.

The Helmholtz-Smoluchowski theory (Helmholtz, 1879, Smoluchowski, 1914) is the generally favoured theory of electroosmosis, and the condenser analogy it adopts assumes that the soil capillaries have charges of one sign on or near the surface of the wall (negative) and countercharges (positive) concentrated in a double layer protruding a small distance from the wall. the remaining void is assumed to be filled with free pore fluid, as shown below



Gambar 2: Model Helmholtz-Smoluchowski untuk aliran elektroosmotik (Mitchell, 1943)

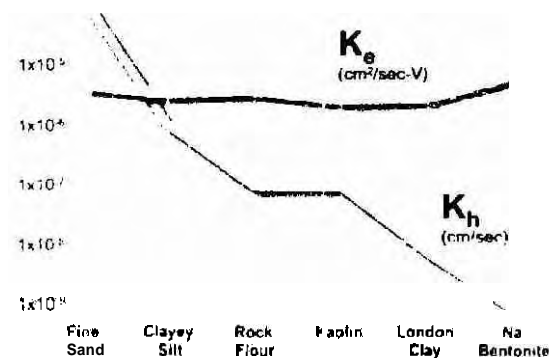
The Helmholtz-Smoluchowski theory states that upon the application of an electrical potential difference across the system the mobile shell of counter-ions drags water through the capillary by plug flow, resulting in a high velocity gradient between the two plates of the 'condenser'. The rate of water flow is controlled by the balance between the electrical force causing water movement in one direction and friction between the liquid and the wall in the other. The overall flow (qA) generated by the application of a potential difference (V) may be expressed as (Mitchell, 1993):

$$qA = k_e \frac{V}{L} A$$

where k_e is the electroosmotic permeability of the soil; V/L is the electrical potential gradient; and A is the cross-sectional area of the soil sample across which the potential difference is applied. As such this is analogous to Darcy's Law of hydraulic flow. Where Q is the flow rate; k_h is the hydraulic permeability; i_h is the hydraulic gradient and A is the cross sectional area of the soil.

$$Q = k_h i_h A$$

The overriding benefit of electroosmosis is that k_e is independent of pore size and has a relatively constant value in soils. This is in stark contrast to hydraulic permeability (k_h) which decreases markedly with pore size as shown below.



Gambar 3: Performa electroosmotik pada berbagai jenis tanah

This means that as soils become finer and more impermeable, the relative benefit of electroosmotic flow increases. The net result is that electroosmosis can cause significant flow of water in materials that under normal circumstances are effectively impermeable. This result has profound ramifications for engineering disciplines.

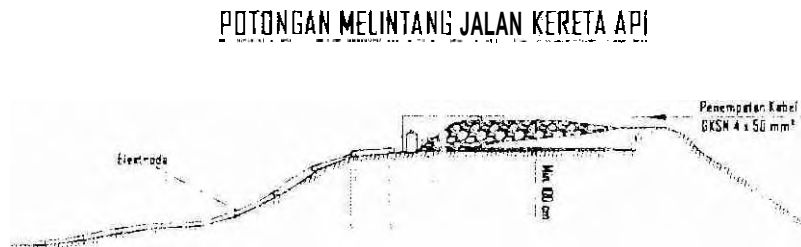
3.2. Pengalaman di Beberapa Negara

Pada tahun 1939 Casagrande (1952) pertama kali mendemonstrasikan penerapan elektrokinetik untuk meningkatkan tegangan efektif pada tanah berbutir halus yang berkadar kadar air tinggi dengan cara menghasilkan tekanan air pori negatif. Dia memanfaatkan peningkatan kuat geser tersebut untuk menstabilisasi timbunan tanah jalan kereta yang terjal. Sejak saat itu, penerapan elektrokinetik secara luas digunakan untuk menyelesaikan berbagai permasalahan teknik.

Timbunan tanah dan lereng yang tidak stabil merupakan masalah utama yang sering dihadapi oleh jawatan pengelola kereta api dan jalan. Di banyak kasus ketidakstabilan disebabkan secara langsung oleh drainase yang jelek selama konstruksi. Di beberapa negara seperti Jerman, Ceko dan Inggris jawatan kereta api sering menghadapi permasalahan ini di jaringan jalan mereka. Permasalahan ini diperkirakan akan meningkat di masa mendatang sebagai akibat perubahan iklim, sehingga diperlukan metode perbaikan yang murah dan mudah. Perbaikan tanah dengan metode elektrokimia (*dewatering* dan *grouting elektrokimia*) merupakan inovasi baru untuk menyelesaikan permasalahan yang endemik tersebut dengan cepat dan tanpa mengganggu operasi kereta (Draganov, 1988).

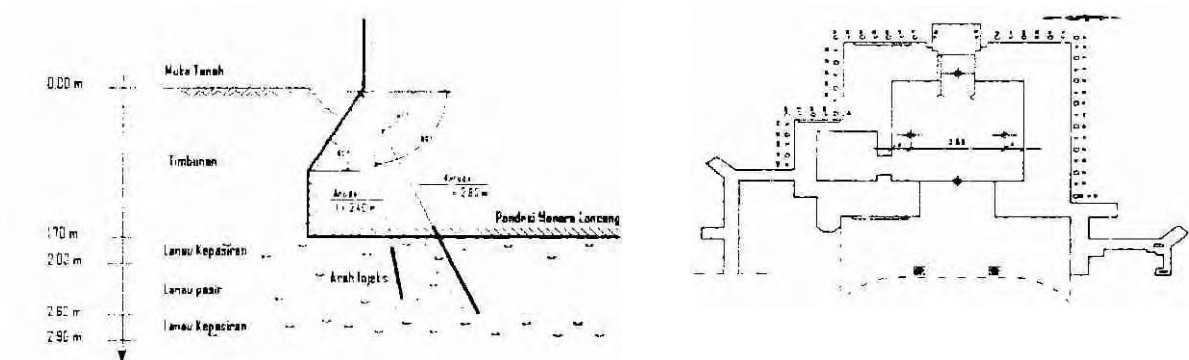


Gambar 4. Installasi Elektroda Electrokinetik untuk mengontrol kadar air dari timbunan tanah pada jalan kereta.



Gambar 5 Skema penempatan elektroda untuk perbaikan timbunan tanah jalan kereta (Draganov, 1988)

Perbaikan tanah dengan metode injeksi elektrokimia juga dilakukan oleh beberapa peneliti untuk perkuatan tanah di bawah pondasi bangunan yang mengalami keruntuhan akibat dimakan usia atau permasalahan lingkungan seperti penurunan muka air tanah. Seperti halnya perbaikan timbunan tanah, aplikasi metode ini dilakukan dengan menginjeksikan larutan yang berfungsi sebagai semen dan mengisi air pori yang hilang. Setelah pelaksanaan stabilisasi tanah dengan metode elektrokimia sisa lubang bor diisi dengan larutan semen biasa.



Gambar 6 Skema perbaikan tanah di bawah pondasi bangunan dengan metode injeksi elektrokimia dan distribusi penempatan elektroda (Azzam, 1997)

Di Indonesia kasus keruntuhan timbunan tanah baik untuk keperluan jalan kereta maupun tanggul / bendungan juga sering dijumpai. Contoh kasus terakhir adalah keruntuhan timbunan tanah Situ Gintung di Tangerang setahun yang lalu. Juga keruntuhan timbunan untuk jalan kereta juga terjadi pada jalan kereta jalur selatan di Jawa Barat (Kompas, 26 Februari 2009). Permasalahan penurunan pondasi akibat perubahan muka air dan konsolidasi tanah di Indonesia juga telah dijumpai di kota besar, seperti di Jakarta (Kompas, 5 Maret 2009).

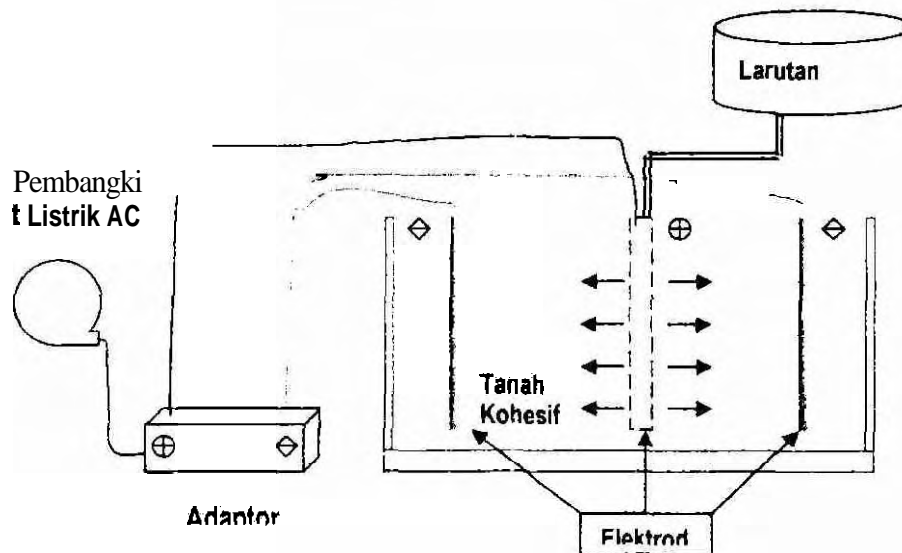
4. METODOLOGI dan RANCANGAN PERCOBAAN

4.1. Tahapan kegiatan

Pada tahun pertama penelitian difokuskan pada eksperimen di laboratorium dalam skala percontohan. Percobaan dilakukan di Labotatorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Semua peralatan yang dirancang dan dibuat oleh Tim Peneliti, baik di bengkel milik Universitas Brawijaya maupun di luar universitas. Bagan alir tahapan percobaan disajikan pada gambar 7.

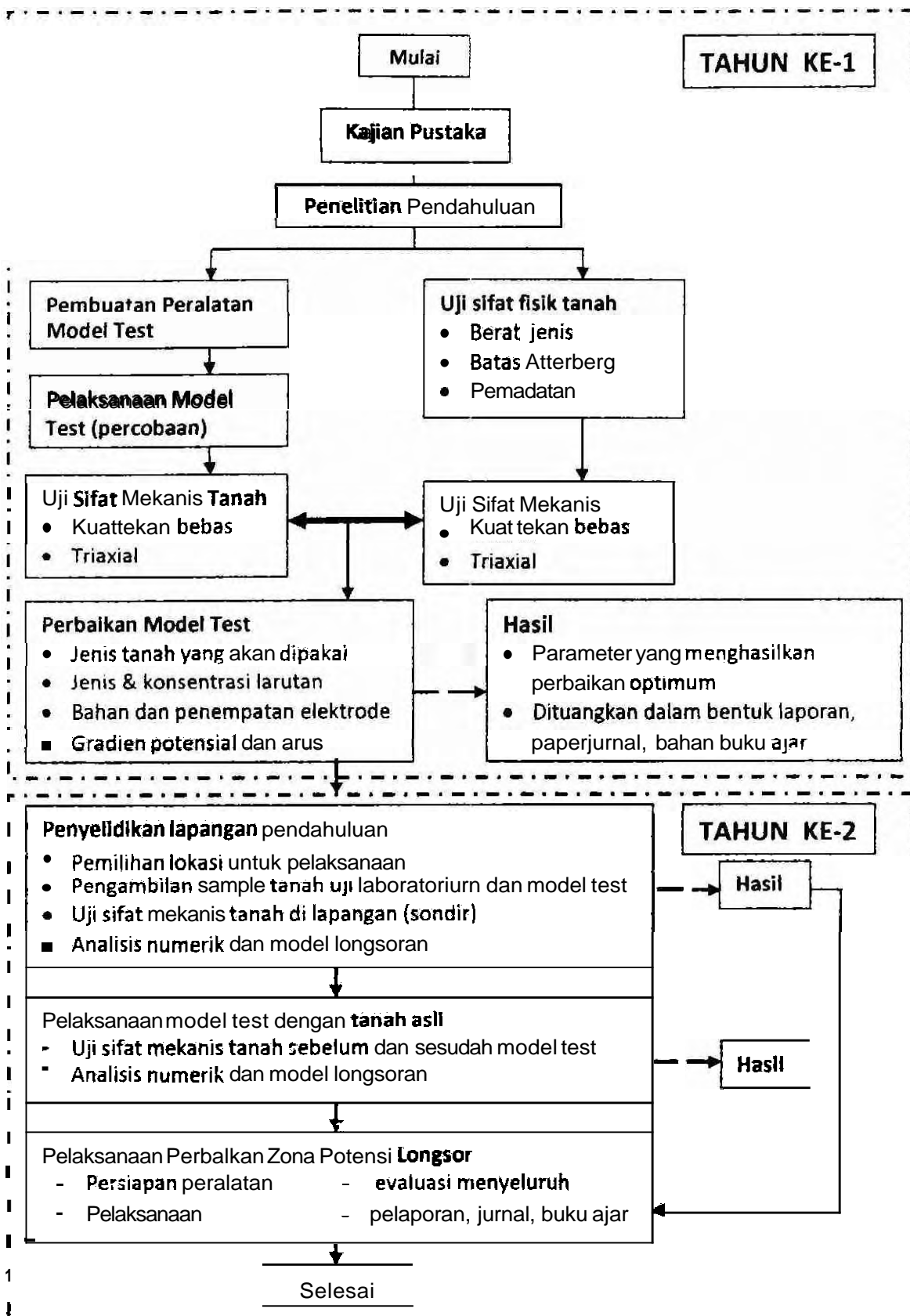
4.2. Model Test di Laboratorium

Model fisik percobaan laboratorium skala percontohan disajikan pada gambar 8 berikut



Gambar 8: Model test injeksi elektrokimia di Laboratorium dengan skala percontohan

Fenomena elektrokinetik yang menjelaskan hubungan antara aliran air dengan aliran listrik pertama kali difemukakan oleh Reuss tahun 1809. Dalam bidang geoteknik fenomena ini pertama kali dimanfaatkan oleh Casagrande tahun 1952 untuk menurunkan kandungan air (dewatering) pada tanah berbutir halus, sehingga kuat gesernya meningkat.



Gambar 7. Bagan alir tahapan penelitian

Tabel 1: Metode pengujian sifat fisik tanah dan sifat mekanis tanah

No	Jenis Pengujian	Kode SNI
1	Kadar Air Tanah	03-1965-1990
2	Berat Jenis Tanah	03-1964-1990
3	Batas Cair dengan Alata Casagrande	03-1967-1990
4	Batas Plastis Tanah	03-1966-1990
5	Batas Susut Tanah	03-3422-1994
6	Kepadatan Tanah Maksimum dengan Kadar Air Optimum	03-2832-1992
7	Kuat Tekan Bebas Tanah Kohesif	03-3638-1994
8	Triaxial untuk tanah kohesif dalam keadaan tanpa konsolidasi dan tanpa dwnase	03-4813-1998

4.4. Variabel Pengujian

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jenis bahan pengikat atau larutan semen dan besarnya arus yang diperlukan untuk mentransportnya, sedangkan variabel terikat adalah kuat geser tanah, baik dengan metode triaxial maupun kuat tekan bebas. Rancangan percobaan disajikan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2 Rancangan percobaan

	1V/cm, arus tetap	1V/cm, arus berubah
Ca(OH)₂ 0,28 N	Kuat Geser A1	Kuat Geser A2
CaCl₂ 20%	Kuat Geser B1	Kuat Geser B2
NaCO₃ + CaCl₂	Kuat Geser C1	Kuat Geser C2
PNS	Kuat Geser D1	Kuat Geser D2
PNS + CaCl₂	Kuat Geser E1	Kuat Geser E2

4.5. Jadwal Kegiatan

Jadwal kegiatan mengalami perubahan dari rencana saat penyusunan proposal, karena mengalami kendala pada pembuatan adaptor Peralatan ini sangat penting, karena menentukan tanpa alat tersebut penelitian tidak dapat dilakukan. Jadwal yang telah direvisi disajikan pada bagian berikut.

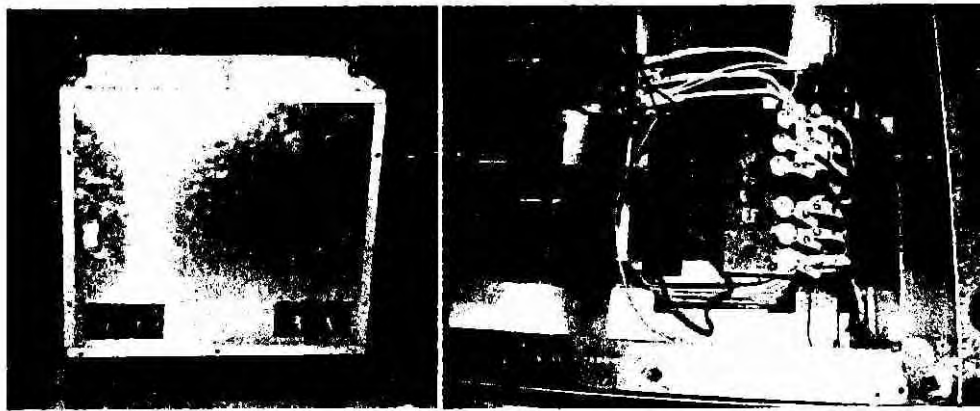
Tabel 3: Jadwal kegiatan penelitian terkoreksi

No	Jenis Kegiatan	jun	jul	ags	sep	okt	nop	des
1	Studi pustaka terkait tema yang lebih mendalam		xxx					
2	Pemilihan dan pengujian bahan pengikat (semen) yang dapat terpolarisasi pada medan listrik		xxx	xxx				
3	Penyiapan peralatan untuk percobaan laboratorium			xxx	xxx	x		
4	Pelaksanaan percobaan laboratorium skala percontohan, juga pengujian tanah hasil perbaikan					xxx	xxx	
5	Penyusunan laporan penelitian, seminar dan penulisan paper untuk publikasi ilmiah nasional						xxx	xxx
6	Penyusunan buku ajar						xxx	xxx

5. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1. Konstruksi Adaptor dan Regulator

Pada saat laporan ini disusun adaptor beserta rangkaianannya yang berfungsi untuk merubah arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC) telah selesai dibuat. Travo sebagai komponen utama adaptor mempunyai berat total 40 kg. Untuk menjaga keselamatan operator telah dibuatkan kotak pengaman yang terbuat dari bahan isolator dan memudahkan pemindahan dan dilengkapi roda (Gambar 9). Adaptor yang dibuat dapat menghasilkan beda tegangan sampai 40 V dan arus listrik 10A.

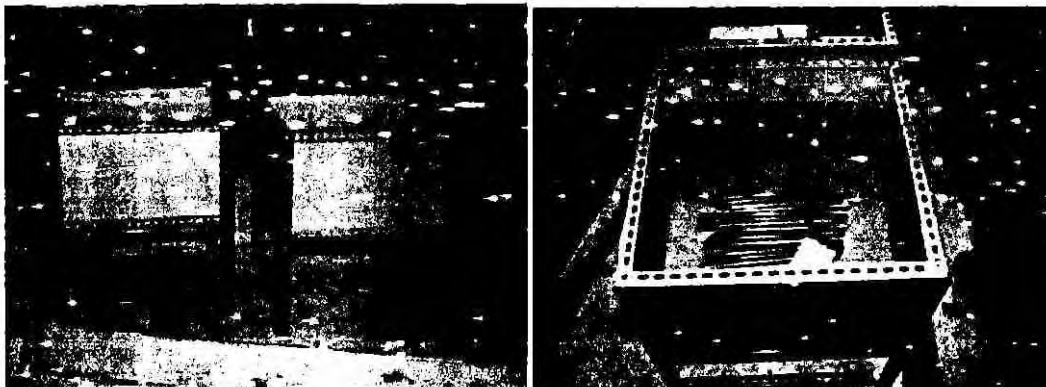


Gambar 9 Adaptor yang telah dibuat di Laboratorium Tegangan Jurusan T Elektro UB

Karena beda tegangan (V) yang dihasilkan cukup tinggi dan arus yang dihasilkan diharapkan stabil, maka diperlukan regulator. Peralatan ini juga berfungsi untuk penstabil tegangan yang diperoleh dari jaringan listrik dan PLN.

5.2. Konstruksi Bak Percobaan dan Perlengkapan lain

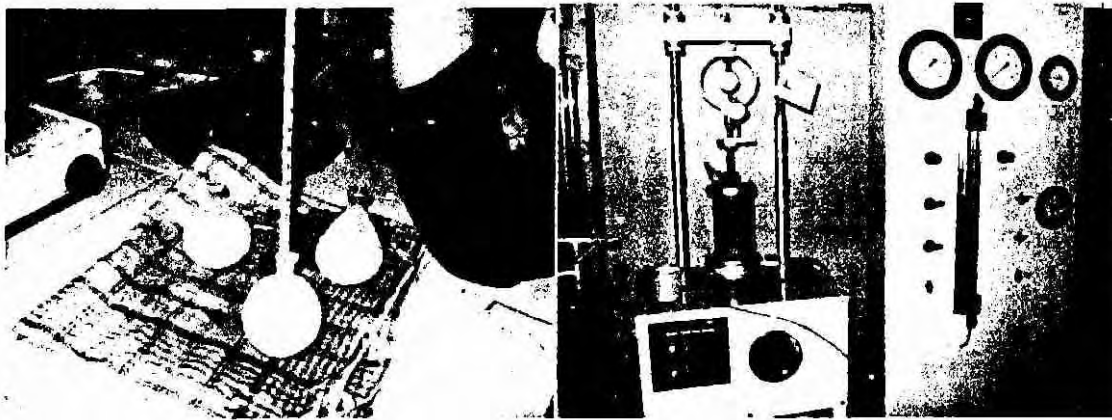
Kotak untuk pelaksanaan percobaan berikut elektroda dan beberapa perlengkapan kecil lainnya juga telah dibuat (Gambar 10). Selama pembuatan perangkat percobaan ini tidak dijumpai kesulitan yang berarti, karena semua bahan tersedia di kota Malang.



Gambar 10. Kotak percobaan untuk uji injeksi elektrokimia

5.3. Pengujian Sifat-sifat Fisik dan Mekanis Tanah Kaolin

Uji sifat-sifat fisik tanah kaolin yang dilakukan meliputi berat jenis butiran tanah (Gs), batas-batas Atterberg, dan kepadatan tanah. Uji sifat mekanis tanah kohesif yang dilakukan meliputi uji kuat tekan bebas dan uji triaxial tidak terkonsolidasi dan tidak terdrainase.



Gambar 11 Beberapa kegiatan uji sifat-sifat tanah kaolin, penentuan berat jenis butiran (kiri) dan pengujian sifat geser dengan metode triaxial (kanan)

a. Berat Jenis Butiran Tanah

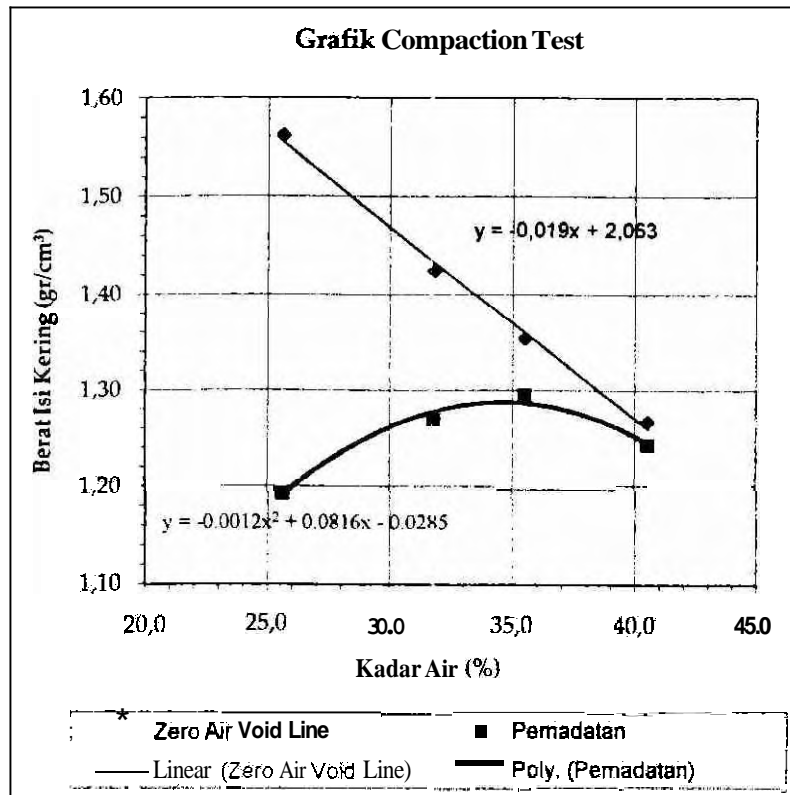
Dari hasil dua kali pengukuran diperoleh rata-rata berat jenis butiran tanah kaolin sebesar 2.605

b. Batas-batas Atterberg

Penentuan batas Atterberg tanah berbutir halus dilakukan untuk menentukan jenis / klasifikasi tanah. Dan pengujian didapatkan angka batas cair (*liquid limits / LL*) sebesar 54,14% dan batas plastis (*plastic limits / PL*) sebesar 38,40%, sedangkan harga Index Plastisitas sebesar 15,74%. Dan angka-angka tersebut contoh tanah yang digunakan model rest dalam klasifikasi IJSCS termasuk CH (high plasticity clay).

c. Kepadatan dan Kadar Air Optimum

Uji kepadatan untuk menentukan kadar air optimum umumnya digunakan dalam perencanaan pemadatan tanah timbunan, baik untuk pembangunan jalan maupun lainnya. Dalam penelitian ini uji kepadatan diperlukan untuk menentukan kadar air pembasahan tanah kaolin sebelum dilakukan injeksi elektrokimia. Hasil uji kepadatan disajikan pada gambar 12. Dari uji tersebut kadar air optimum (OMC) untuk mencapai kepadatan maksimum adalah 34,7%, sedangkan harga kepadatan atau berat volume kering maksimum sebesar 1.284 gr/cm³.



Gambar 12 Hasil uji kepadatan tanah kaolin 100% dan *zero air void*-nya

d. Kuat Tekan Bebas

Untuk uji kuat tekan bebas contoh tanah diambil dari bak model test sebelum dilakukan injeksi elektrokimia dengan tabung. Pembasahan disesuaikan hasil uji pemadatan, namun tidak dilakukan pemadatan. Hasil uji kuat tekan bebas (q_u) contoh tanah sebesar 0,1082 kg/cm².

e. Triaxial

Pengambilan contoh tanah untuk uji triaxial sama dengan untuk uji kuat tekan bebas, hanya saja untuk uji ini paling sedikit dibutuhkan minimum 3 sample. Hasil uji triaxial menunjukkan, bahwa harga kohesi (c) sebesar 0,0271 dan sudut geser dalam (Φ) sebesar 2,3975°.

5.4. Percobaan Pendahuluan

Percobaan pendahuluan dilakukan untuk mengetahui peralatan yang telah dibuat, apakah dapat bekerja dengan baik, dan memahami proses injeksi elektrokimia lebih mendalam (Gambar 13). Juga untuk mengetahui beberapa faktor lain dan kendala yang belum diperhitungkan sebelumnya. Hasil uji sifat mekanis tanah sebelum dan sesudah injeksi disajikan pada tabel 4 dan 5.

Selama percobaan terdapat beberapa kendala, seperti pemadaman listrik oleh PLN, kesulitan pengambilan sample tanah untuk uji sifat mekanis tanah, baik sebelum maupun

setelah injeksi elektrokimia, dan pemadatan yang perlu dilakukan agar tidak mempengaruhi hasil percobaan



Gambar 13 Rangkaian percobaan pendahuluan

Tabel 4. Injeksi Larutan CaCl_2 20%

Pengujian	Parameter Sebelum Injeksi				Parameter Setelah Injeksi			
Unconfined Test/ Kuat Tekan Bebas	w (%)	c	q_u	Kuat Geser	w (%)	c	q_u	Kuat Geser
	34,2200	0,0541	0,1082		39,4359	0,1453	0,2907	
Triaxial Test	w (%)	c	Φ	Kuat Geser	w (%)	c	Φ	Kuat Geser
	34,2200	0,0271	2,3975	0,0689	38,0560	0,0255	4,7490	0,1086

Tabel 5 Injeksi Larutan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 2,80%

Pengujian	Parameter Sebelum Injeksi				Parameter Setelah Injeksi			
Unconfined Test / Kuat Tekan Bebas	w (%)	c	q_u	Kuat Geser	w (%)	c	q_u	Kuat Geser
	34,2200	0,0541	0,1082		47,3733	0,0642	0,1284	
Triaxial Test	w (%)	c	Φ	Kuat Geser	w (%)	c	Φ	Kuat Geser
	34,2200	0,0271	2,3975	0,0689	48,7916	0,0697	1,5581	0,09687

5.5. Pembahasan

Dari percobaan pendahuluan **injeksi elektrokimia selama tujuh hari yang telah** dilakukan beberapa hal dapat diamati antara lain

- Jumlah larutan semen Ca(OH)_2 yang dapat diinjeksikan lebih **banyak** dibandingkan CaCl_2 . Hal ini berakibat pada akhir percobaan kandungan air tanah pada bak dengan semen Ca(OH)_2 lebih tinggi, meskipun sudah dilakukan dewatering. Selanjutnya hal ini menyebabkan peningkatan kuat gesernya rendah.
- Elektroda positif (anoda) untuk mengalirkan larutan semen CaCl_2 lebih cepat korosif dibandingkan larutan Ca(OH)_2 . Hal ini kemungkinan disebabkan terjadi pembentukan garam di sekitar anoda sebagaimana ditunjukkan oleh pembentukan oksida tembaga yang berwarna hijau di sekitar elektroda.
- Selama percobaan beda potensial tidal, mengalami perubahan, sedangkan arus berubah-ubah, terutama pada larutan semen CaCl_2 . Hal ini kemungkinan disebabkan oleh proses korosif yang terjadi pada anoda.

6. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari percobaan yang telah dilakukan antara lain

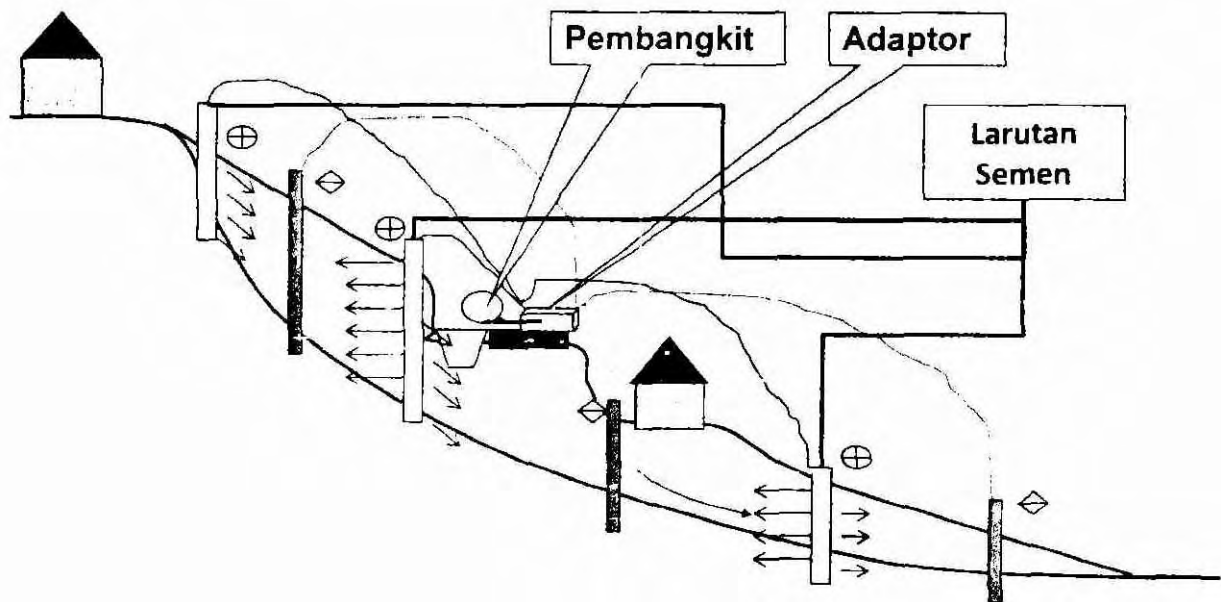
- Injeksi elektrokimia dengan larutan CaCl_2 dan Ca(OH)_2 dapat meningkatkan kuat geser tanah lempung kaolin
- Peningkatan kuat geser setelah injeksi elektrokimia dengan CaCl_2 lebih tinggi dibandingkan dengan Ca(OH)_2 . Hal ini kemungkinan disebabkan masih tingginya kandungan air pada contoh tanah kedua
- Anoda untuk injeksi larutan CaCl_2 lebih cepat korosif dibandingkan dengan untuk injeksi larutan Ca(OH)_2
- Pelaksanaan model test perlu beberapa perbaikan, terutama proses dewatering pada tanah setelah diinjeksi elektrokimia, karena kandungan air tanah pada lempung sangat menentukan sifat mekanisnya.

7. RENCANA PENELITIAN SELANJUTNYA

Pada tahap selanjutnya penelitian difokuskan pada perbaikan model test. Penelitian ini akan menggunakan dana tahun pertama yang masih tersisa. Perbaikan yang perlu dilakukan antara lain:

- Elektroda dibuat dari bahan yang lebih tahan terhadap proses korosi
- Susunan elektroda negatif (katoda) dibuat segi enam, agar proses transport larutan semen lebih cepat dan merata
- Tanah kaolin 100% perlu diganti dengan campuran kaolin 70% dan pasir halus 30% agar pembuatan sample untuk uji mekanis lebih mudah
- Konsentrasi larutan CaCl_2 diturunkan menjadi 10% sampai 15%, agar dapat memperlambat proses korosi pada elektroda positif
- Pengambilan sample tanah sebelum dan sesudah eksperimen injeksi elektrokimia diupayakan sama, yakni dari bak percobaan.
- Proses drainase / dewatering air pada model test perlu diperbaiki, yakni dengan memasang pompa atau saluran dan elektroda negatif (katoda)

Dana penelitian yang diajukan pada tahun kedua akan digunakan untuk penelitian aplikasi di lapangan. Sebelum dilakukan penerapan di lapangan akan dilakukan model test terlebih dahulu dengan sample tanah asli (Gambar 7), selain itu juga akan dilakukan dibuat model numerik longsor yang akan terjadi. Model pelaksanaan penelitian lapangan sebagaimana gambar 14 berikut.



Gambar 14. Model pelaksanaan perbaikan zona potensi longsor dengan injeksi elektrokimia di lapangan

8. PUSTAKA

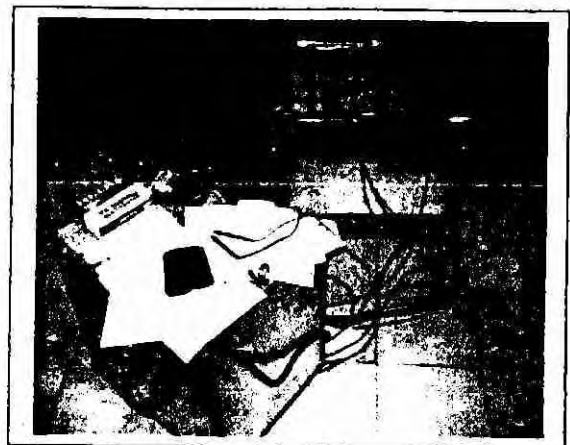
- **Draganov, L., et. all., 1988, *Erfolgreiche elektrochemische Verfestigung von Boeden im Gleisbett von Eisenbahnlinien*, in *Freiberger Forschunghefte, Spezialverfahren im Bergbau und Bauwesen*. A 771.**
- **Gallagher, P. M., et. all, 2007, *Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation Liquefaction Risk*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 133 No.2 .p. 186 – 196, ASCE**
- **Hartlen, J. & Viberg, L., 1998. *General Report : Evaluation of Landslide Hazard*, in Proceeding of International Association of Engineering Geologist Annual Meeting, Athens**
- **Mitchell, J K., 1993, *Fundamental of Soil Behavior*, 2nd edition, John Willey Scientific, Toronto**
- **Rachmasyah, A., 2002, *Soil Improvement with Elektroosmosis Methode*, Research Report, Toray Foendation, Unpublished**
- **Rachmansya, A., 2008. *Pemetaan Potensi Bencana di Kecamatan Gedangan dan Bantur Kabupaten Malang*. Dinas Energi dan Sumberdaya Mineral Kabupaten Malang, tidak dipublikasikan.**
- **Rachmansyah, A, 2006, *Pengaruh Kadar Air pada Saat Pemadatan terhadap Kuat Geser Tanah Lempung Kaolin*, Jurnal Teknik Edisi Agustus 2006**
- **Sachan, A & Penumadu, D, 2007, *Effect of Microfabric on Shear Behavior of Kaolin Cloy*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 133 No.3 .p. 306 – 318, ASCE**
- **Oey, W & Azzam, R, 1999, *Einfluss des pH-Werts im Boden auf das Zero Potensial und dessen Zusammenhang mit dem electroosmotischen Durchlaessigkeitbeiwert (k_e)*, Geotechnik Vol. 22 No. 3, p. 192 – 200, Deutschen Gesellschaft fuer Geotechnik.**

LAMPIRAN

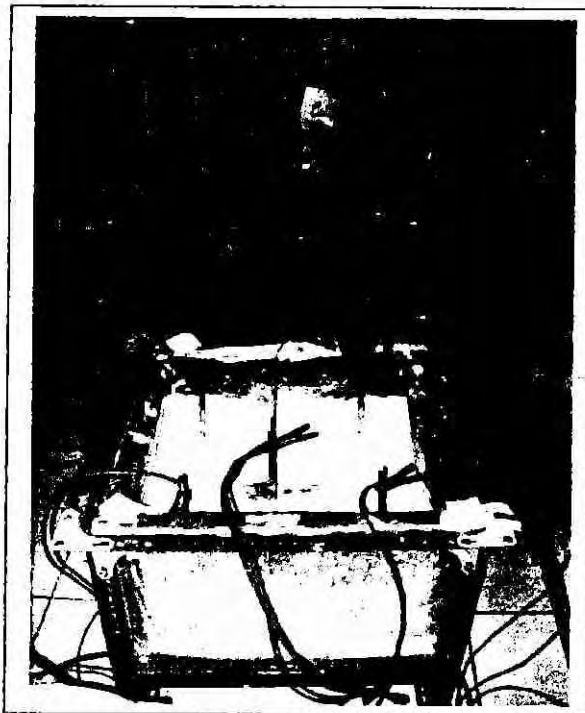
FOTO KEGIATAN



a



b



d



c



e

Keterangan (searah jarum jam)

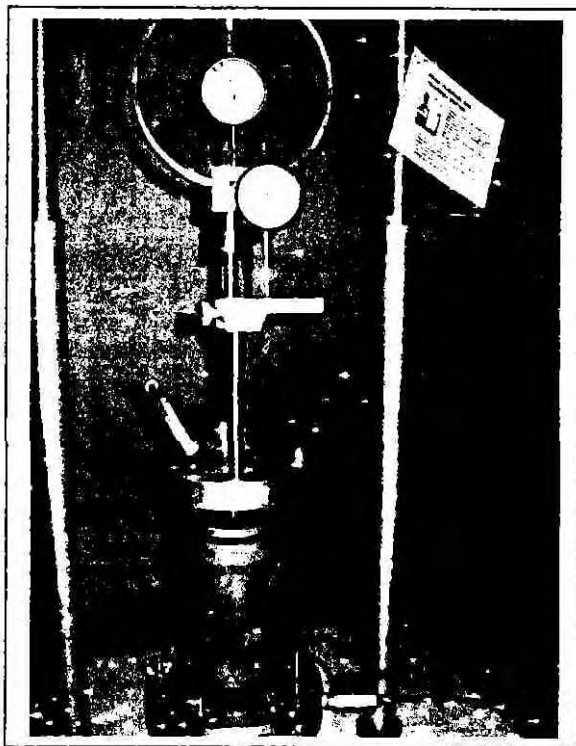
- a Pembasahan tanah lempung sebelum dimasukkan dalam bak model test
- b Penyambungan elektroda dengan adaptor dan regulatormya
- c Pengukuran beda tegangan selama proses injeksi berlangsung
- d Korosi yang terjadi pada injeksi dengan larutan CaCl_2
- e Elektroda yang mengalami korosi



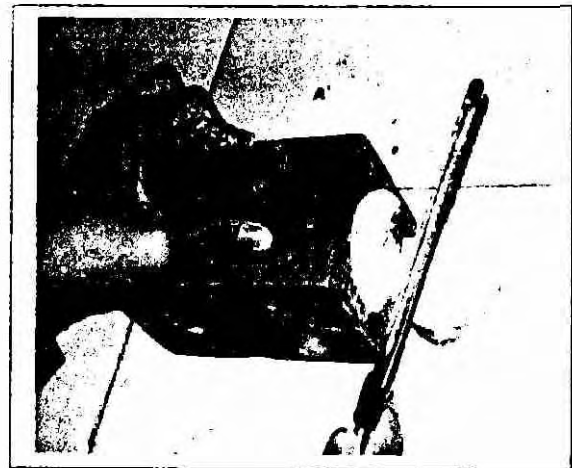
a



b



d



c

Keterangan (searah jarum jam)

- a Hasil pengambilan sample dari bak model test
- b. Pengeluaran sample dari tabung
- c Penyiapan sample sebelum uji kuat tekan bebas dan triaxial
- d. Uji triaxial

BAHAN AJAR
Lecture Note
KULIAH PERBAIKAN TANAH
Soil Improvement

**Application of Elektrokinetic Phenomena
in Geoengineering and Geoenviromental**

Oleh
Dr. rer. nat. Arief Rachmansyah
Dr. Eng. Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik
Universitas Brawijaya

I. Preface

I.1 Background

The electrokinetic phenomena that shows coupling between electrical and hydraulic flows have been well established since their discovery by Reuss in 1809. In geotechnical area Casagrande in 1952 demonstrated first time the application electrokinetic to increase in the effective stress of fine grain soil. Since that time, however, the widespread application of electrokinetic has been prevented by a variety of technical problems, typically related to the limitations of available electrodes. In the last two decades some institutions developed electrokinetic phenomena to remediate of contaminated soil by heavy metal and organic solution. The study on the application of this phenomenon in geoengineering and geoenvironmental should be developed widespread.

1.2 History of Electrokinetik Phenomena

The ability of electrokinetic phenomena to transport water, charged particles and free ions through fine-grained soils has been well established since their discovery by Reuss in 1809

The water content of fine-grained soils is a fundamental physical characteristic of the material and has a large impact on the material's strength. Controlling water in fine-grained soils, such as clay, is therefore of paramount importance but presents recurrent problems owing to the very low hydraulic permeability of the materials

In 1939, Casagrande (1952) demonstrated that applying electrokinetics to fine-grained soils with high water contents resulted in an increase in the effective stress within the soil through the generation of negative pore water pressures. He used this to increase soil shear strength and thus stabilize steep railway cuttings. Since that time, however, the widespread application of electrokinetics has been prevented by a variety of technical problems.

1.3 Conduction Phenomena

Fluids, electricity, chemicals, and heat flow through soils. It has been well established that, provided the flow process does not change the state of the soil, each flow rate or flux (as shown in Fig 1.1) relates linearly to its corresponding driving force X_1 according to

$$J_i = L_{ij} X_j \quad (1.1)$$

in which L_{ij} is the conductivity coefficient for flow. When written specifically for a particular flow type and in term of familiar phenomenological coefficients, equation (1.1) becomes.

Water flow	$q_h = k_h i_h$	Darcy's Law	(1.2)
------------	-----------------	--------------------	-------

Heat flow	$q_t = k_t i_t$	Forier's law	(1.3)
-----------	-----------------	---------------------	-------

Electrical flow	$I = \sigma_e i_e$	Ohm's law	(1.4)
-----------------	--------------------	------------------	-------

Chemical flow	$J_D = D i_c$	Fick's law	(1.5)
---------------	---------------	-------------------	-------

In equation (1.2) to (1.5) q_h , q_t , I , and J_D are the water, heat, electrical and chemical flow rates, respectively, The coefficients k_h , k_t , σ_e , and D are the hydralic, thermal, electrical conductivities and the diffusion coefficient. The driving forces for flow are given by the respective hydraulic, thermal, electrical, and chemical gradient, i_h , i_t , i_e , and i_c .

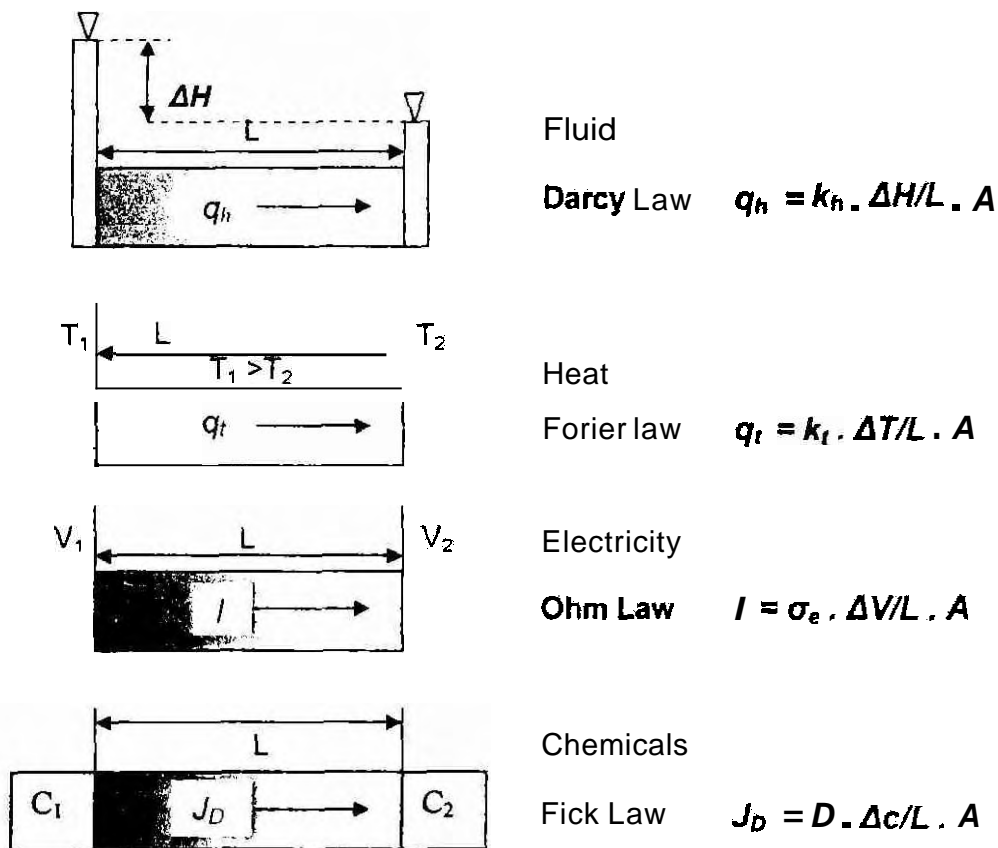


Figure 1. Four types of direct flow through a soil mass (Mitchel 1993)

The terms in equation (1.2) through (1.5) are identified in Fig. 1. And table 1, which shows **analog**s between the various flow types. As long as the **flow** rates and gradients are linearly related, the mathematical treatment of each flow type is the same, and solution for flow of one type may be used for problems of another type provided the property values and boundary conditions are properly represented. Two well known practical illustrations of this are the correspondence between **Terzaghi** theory for clay consolidation and **one-dimensional** transient heat flow, and the use of electrical analogies for the study of seepage problem.

Table 1. Conduction Analogies (Mitchel, 1993)

	Fluid	Hydr	Electrical	Chemical
Potential	Total Head h (m)	Temperature T ($^{\circ}\text{C}$)	Voltage V (volts)	Chemical potential μ or concentration c (moles m^{-3})
Storage	Fluid volume W (m^3/m^3)	Thermal energy u (J/m^3)	Charge Q (Coulomb)	(moles)
Conductivity	Hydraulic conductivity λ (m/sec)	Thermal conductivity k_t ($\text{W}/\text{m}/^{\circ}\text{C}$)	Electrical conductivity σ (siemens/m)	Diffusion coeff. D (m^2/sec)
Flow	q_h (m^3/sec)	q_t (J/sec)	Current I (amp)	J_D (moles/sec)
Gradient	$i_h = -\frac{\partial h}{\partial x}$ (m/m)	$i_t = -\frac{\partial T}{\partial x}$ ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$)	$i_e = -\frac{\partial V}{\partial x}$ (v/m)	$i_c = -\frac{\partial c}{\partial x}$ (moles m^{-4})
Conduction	Darcy's law $q_h = -k_h \frac{\partial h}{\partial x} A$	Fourier's law $q_t = -k_t \frac{\partial T}{\partial x} A$	Ohm's law $I = -\sigma \frac{\partial V}{\partial x} A = \frac{V}{R}$	Fick's law $J_D = -D \frac{\partial c}{\partial x} A$
Capacitance	Coefficient of volume change $M = \frac{dW}{dh} = \frac{\gamma_w \alpha_v}{1 + e} = \frac{k_h}{c_v}$	Volumetric heat C ($\text{J}/^{\circ}\text{C}/\text{m}^3$) $C = \frac{dQ}{dT}$	Capacitance C (farads = coul/volt)	
Continuity	$\frac{\partial W}{\partial t} + \nabla q = 0$	$\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla q_t = 0$	$\frac{\partial Q}{\partial t} + \nabla I = 0$	$\frac{\partial(\text{storage})}{\partial t} + \nabla J_D = 0$
Steady state	$\nabla^2 q_h = 0$	$\nabla^2 q_t = 0$	$\nabla^2 I = 0$	$\nabla^2 J_D = 0$
Diffusion	$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{k_h}{M} \frac{\partial^2 h}{\partial x^2}$ $\left(\frac{k}{M} = c_v\right)$	$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_t}{C} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ $\left(\frac{k}{C} = a\right)$	$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\sigma}{C} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2}$	$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$

14 Electrokinetic Phenomena

Coupling between electrical and hydraulic flows and gradient can be responsible electrokinetic phenomena in materials such as fine-grained soil, where there are charged particles balanced by mobile counter charges. There are four recognized electrokinetic phenomena that occur in soil-water mixtures. These are:

- Electroosmosis, movement of water through a solid matrix under an electric field
- Electrophoresis, movement of suspended particles through water under an electric field
- Streaming potential, small electric field caused by the movement of water through a soil matrix
- Sedimentation or migration potential, small electric field caused by movement (sedimentation) of solid particles through water, or movement of cations and anions under an electric field

Of these phenomena, electroosmosis and electrophoresis are the most relevant to the commercial application in Geoengineering and Geoenvironmental. Electroosmosis generally occurs in soils, and electrophoresis tends to occur in slurries and colloids. The boundary between the two processes is somewhat gradational but can be related to Atterberg limits.

When a D.C. voltage is applied across a wet soil mass, ion migration takes place. Positive ions (cations) are **attracted** to the cathode and repelled from the anode and negative ions (anions) are forced in the opposite direction. As the cations migrate along the pore water **■** solid boundary layer they drag with them their water of hydration and exert a viscous drag upon the free pore fluid around them.

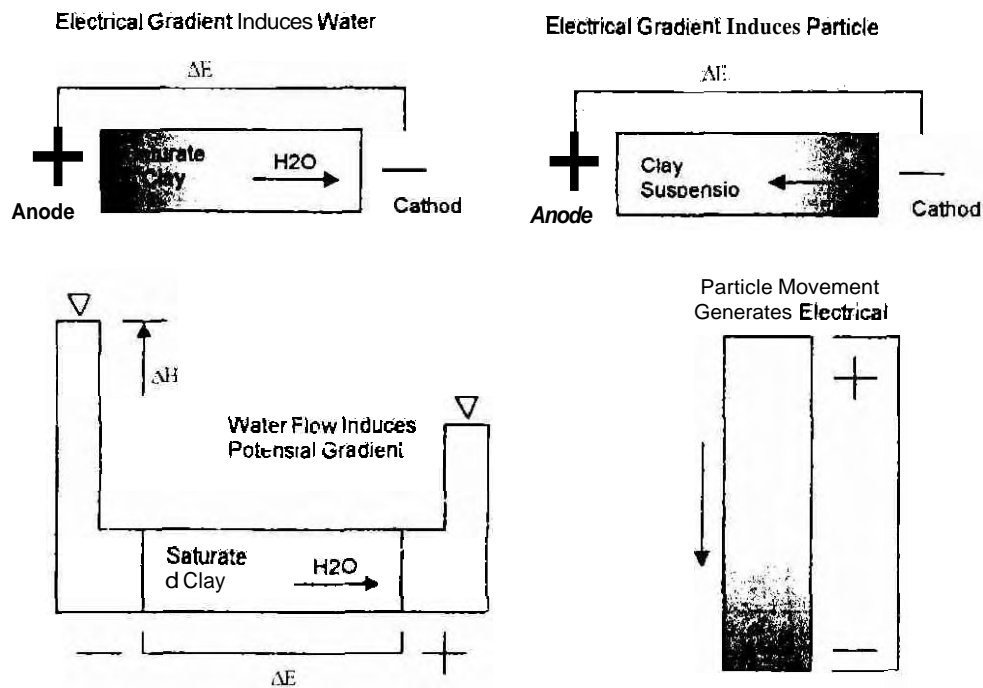


Figure 2. Elektrokinetic phenomena, electroosmosis, electrophoresis, streaming potential and migration or sedimentation potential (clock wise), after Mitchell (1993)

The Helmholtz-Smoluchowski theory (Helmholtz, 1879; Smoluchowski, 1914) is the generally favoured theory of electroosmosis, and the condenser analogy it adopts assumes that the soil capillaries have charges of one sign on or near the surface of the wall (negative) and countercharges (positive) concentrated in a double layer protruding a small distance from the wall, the remaining void is assumed to be filled with free pore fluid, as shown figure 2 below

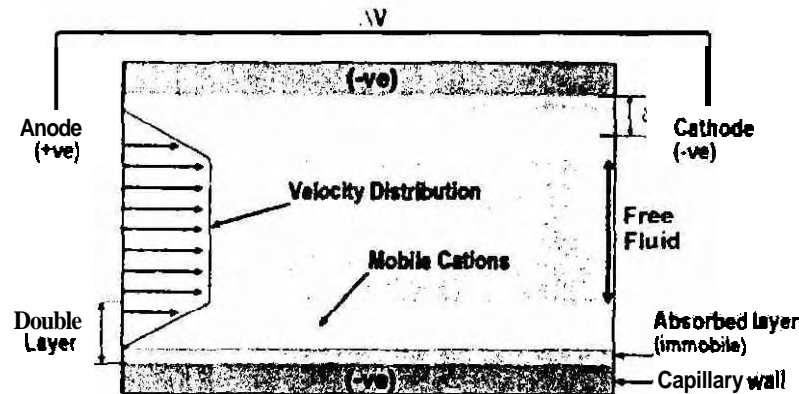


Figure 3: Helmholtz-Smoluchowski Model for electroosmotic flow (After Mitchell, 1993).

The Helmholtz-Smoluchowski theory states that upon the application of an electrical potential difference across the system the mobile shell of counter-ions drags water through the capillary by plug flow, resulting in a high velocity gradient between the two plates of the 'condenser'. The rate of water flow is controlled by the balance between the electrical force causing water movement in one direction and friction between the liquid and the wall in the other. The overall flow (q_A) generated by the application of a potential difference (V) may be expressed as (Mitchell, 1993):

$$q_A = k_e \frac{V}{L} A$$

where k_e is the electroosmotic permeability of the soil; V/L is the electrical potential gradient; and A is the cross-sectional area of the soil sample across which the potential difference is applied. As such this is analogous to Darcy's Law of hydraulic flow. Where Q is the flow rate; k_h is the hydraulic permeability; i_h is the hydraulic gradient and A is the cross sectional area of the soil.

$$Q = k_h i_h A$$

The overriding benefit of electroosmosis is that k_e is independent of pore size and has a relatively constant value in soils. This is in stark contrast to hydraulic permeability (k_h) which decreases markedly with pore size as shown below.

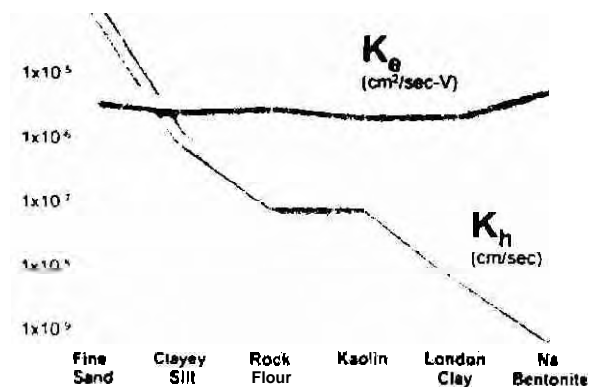


Figure 4: Electroosmotic performance over a range of soils.

This means that as soils become finer and more impermeable, the relative benefit of electroosmotic flow increases. The net result is that electroosmosis can cause **significant** flow of water in materials that under normal **circumstances** are effectively impermeable. This result has profound **ramifications** for engineering disciplines.

15 Application of Electrokinetic in Geoengineering and Geoenvironmental

The water content of fine-grained **soils** is a fundamental physical **characteristic** of the material and has a large impact on the material's strength. Controlling water in fine-grained soils is therefore of paramount importance but presents recurrent problems owing to the **very** low hydraulic permeability of the materials. Electroosmosis can transport water through fine grained soil at up to four orders of magnitude faster than hydraulic techniques. However, in medium to coarse-grained soils it provides a less effective transport mechanism than conventional hydraulic flow because the higher hydraulic **permeability** of these materials permits **backflow** in response to the pressure differentials built up by electroosmosis.

In 1939, Casagrande (1952) demonstrated that applying **electrokinetics** to fine-grained soils with high water contents resulted in an increase in the effective stress within the soil through the generation of negative pore water pressures. He used this to increase soil shear strength and thus stabilise steep railway cuttings. Since the initial work of Casagrande, there have **been** a number applications of electrokinetic phenomena in field projects including: improvement of excavation stability, electrochemical hardening, fine-grained **soil stabilisation**, consolidation, **densification** and **electro** remediation (Pamukcu, 1996).

1 Dewatering and Consolidation

When we are dealing with fine porous materials conventional dewatering methods such as sedimentation, membrane filtration and centrifugation become difficult to use. Electroosmosis as tool for dewatering of fine porous materials has already been demonstrated in the literature

II.1 Vertical Dewatering

In the form of vertical wick drains, has been used by Electrokinetic to consolidate super soft clay. A large hydraulic test vessel was constructed and filled to a depth of 2.4m with several tonnes of kaolin slurry (Fig 4). The clay was left to settle for 100 hours, during this time 50 litres of water was expelled, equivalent to hydraulic consolidation of 20mm. Electroosmosis was then conducted for 500 hours and resulted in a reduction in volume of approximately 930 litres resulting in a moisture content reduction to 62%. The resultant increase in shear strength of the material was from less than 1kPa to about 15 - 35kPa (depending on depth). Water removal and settlement of the surface was most pronounced in the first 150 hours of electroosmotic treatment.

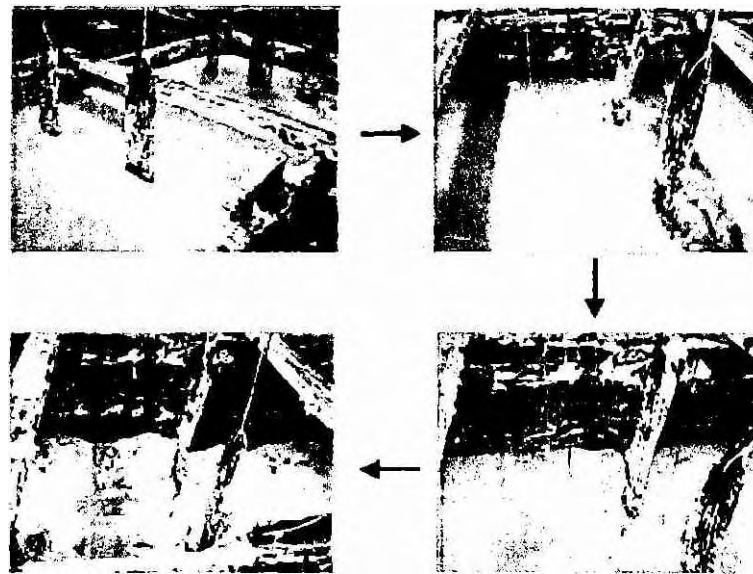


Figure 5: Dewatering of super-soft kaolin clay (Lamont-Black, 2001; Jones et al., 2002).

Water flows by electroosmosis from the anode to the cathode thus the area around the anode experiences the greatest reduction in moisture content and improvement in shear strength. In order to minimise moisture content anisotropy, the trial was completed with a phase of polarity reversal in order to draw water away from the electrodes which were acting as anodes in the first phase. Polarity reversal resulted in a much more even distribution of shear strength in the test soil.

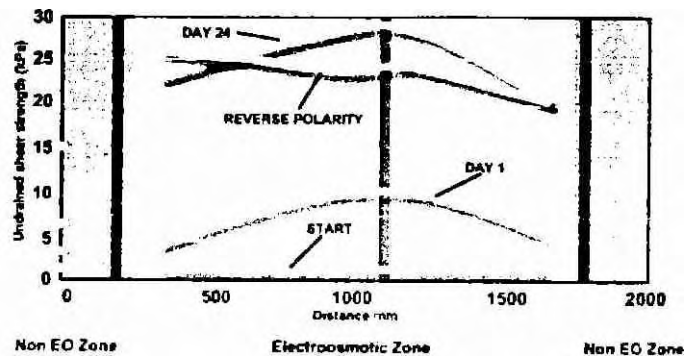


Figure 6: Consolidation - normal and reverse polarity (1.5m depth)

- The bottom axis above represents distance along the length of the test pit
- The grey background of the graph represents a cross section of the soil
- The blue vertical lines represent cathodes and the red line represents the anodes at the start i.e. during normal polarity. These swapped over during reverse polarity
- Plots of undrained shear strength, on different dates, measured at 1.5m depth along the long axis of the test pit

It can be seen that as treatment proceeded the shear strength improved from 2kPa to 34kPa adjacent to the anodes after 24 days of normal polarity treatment. During this time the material adjacent to the cathodes improved to approximately 22kPa within the treatment zone. Outside the treatment zone, normal hydraulic consolidation had improved the strength of the soil to only 6 kPa.

At the end of the normal polarity phase, a distinct difference was seen in the strengths between the anode and cathode areas. Polarity reversal was used to 'smooth out' these differences. This resulted in a flatter curve. Part of this process also improved the shear strength of the soil immediately 'beyond' the treatment (i.e. in the non electroosmotic zone) from approximately 6kPa to between 10 and 15kPa. This test shows the potential for ground improvement by consolidating materials such as alluvial clays and silts in low lying or flood plain areas.

112 Horizontal Dewatering

Most codes of practice do not permit the use of cohesive soils in the construction of reinforced soil for reasons of low strength, high moisture content, creep and low bond strength between the reinforcement and the soil. To illustrate the use of material usually considered to be totally unsuitable, a reinforced-soil wall was constructed with clay slurry. The constructed wall was 4.8m high, 3m wide and 24m long.

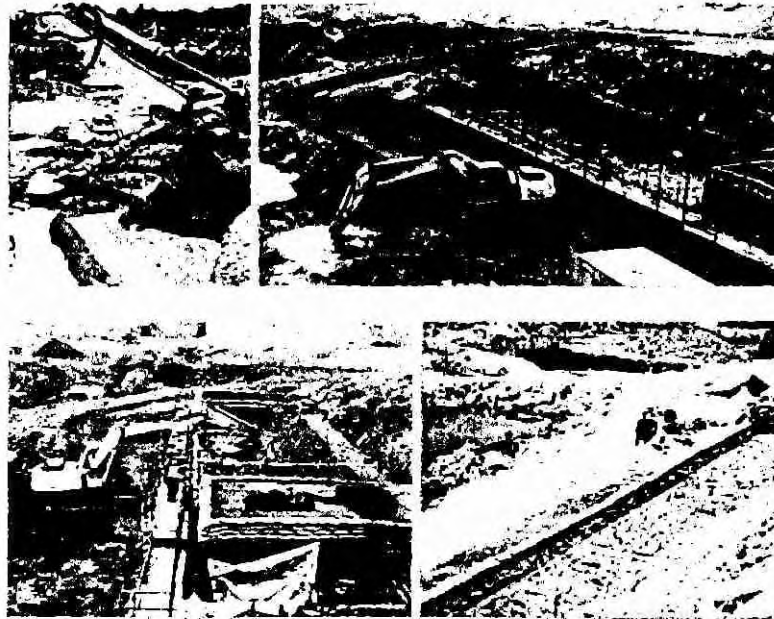


Fig 7 Aerial view of the site showing different stages of consolidation

The wall was constructed using a 'wraparound' design, utilizing sandbags for the front face to temporarily retain the cohesive and granular fills. The ends of the cohesive trial wall were retained using conventional reinforced soil blocks, and the wall was raised using a staged construction technique. Clay slurry was prepared in a pit adjacent to the wall and poured in 300mm layers.

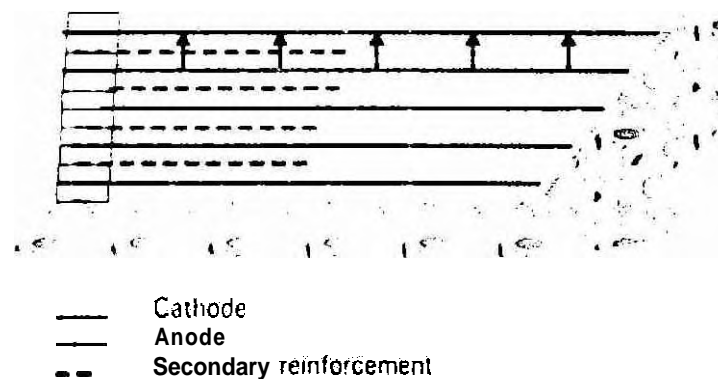


Fig. 8: Construction of a vertical soil structure with super soft clay. In each lift the previous cathode becomes the anode and the previous anode is left in place as a reinforcing element (arrows depict upwards movement of water).

Each lift was constructed and dewatered vertically by electroosmosis applied via horizontally placed electrodes. Once a lift had been successfully treated then the next lift was constructed. So on until the full height of the wall was achieved. After dewatering by electroosmosis, electrode was left in situ to function as the primary reinforcing element.

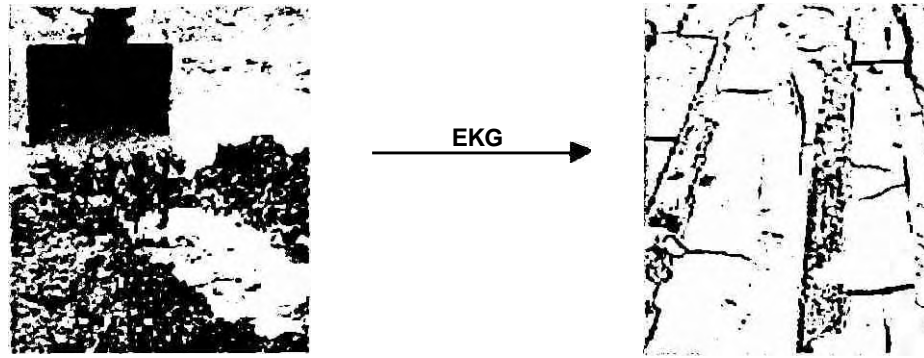


Fig 9 Condition of clay slurry, before and after electroosmosis dewatering

113 Dewatering of Waste

Some research and development work has shown significant gains can be made in enhancing solid/liquid separation in various forms of waste materials including sewage and mineral sledges, mine tailings and construction wastes. These waste materials represent mixtures of fine grained solids with water. The dewatering of sledges is very desirable to reduce volumes, facilitate mechanical handling and recover water. By their nature these materials can be very difficult to dewater and present significant technical challenges.

11.3.1 Sewage Sludge

Sewage sludge occurs in different settings and as different types of material ranging from liquid sludge through to semi-solid sludge (known as cake). Owing to the nature of the particles and their fine grain size, the material has a very low hydraulic permeability, very high water content and very low shear strength. Frequently, sewage treatment processes produce a sludge cake which has solids content in the range of 10 – 20%. This material is difficult to handle, being 'too thin to shovel and too thick to pump'. Electrokinetic has developed applications to dewater sewage sludge cake by electroosmosis. Electroosmosis occurs in sewage sludge because the solid materials have a negative surface charge similar to those seen in clays and silts.

11.3.2 Sewage Lagoons

Historically sewage sludge cake has been deposited in purpose made holding lagoons. In arid parts of the globe, the material in such lagoons slowly dries out. However in more temperate latitudes, rainfall prevents the drying out of the material. In many cases the material can remain in a lagoon for decades with little or no reduction in moisture content or increase in solids content. These lagoons are often sited next to rivers and on the edges of urban areas. This means that lagoons can at the same time pose an environmental threat but also present a development opportunity.

Therefore there are economic and environmental drivers to clean these areas up, but the peculiar nature of sludge cake makes this a significant technical challenge. The alternatives are.

- Dispose of the material to landfill. This has both environmental and economic constraints
- Cover it with a strong membrane. This encapsulation process should reduce the leaching in time but prevents the ground from being developed

- Mix a **stabilizing** material **into** the sludge to strengthen it. This is a very slow, expensive and hazardous process

The electrokinetic approach is to dewater the sludge in **situ** either as a precursor to disposal or a **first** stage of ground Improvement for development. Laboratory scale, single **polarity** electroosmotic consolidation was **carried** out on a sample of sewage sludge from a sewage works in northern England. The results showed:

- an overall volume reduction of 57%
- an Increase in % dry solids from 19% to a maximum of 42%
- an Increase in shear strength from approximately 2kPa to a maximum of 29kPa

Subsequent tests on sewage sludge indicate that although these materials vary appreciably in their **composition**, they **invariably** support the application of **electroosmosis**. Some companies are **working** with major water companies to apply these technology to some persistent problems **associated** with dewatering and stabilizing sewage sludge



Figure 10: This photo shows dewatering sewage cake: untreated material (left) and **after** treatment with single-phase polarity (right).

In addition to the dewatering of sewage lagoons, there is increasing interest in the use of electrokinetics as a dewatering method in the active processing of sewage sludge and mine **tailings**. Trials at Electrokinetic have shown important gains in dry solids contents when compared to standard hydraulic techniques, see graph below.

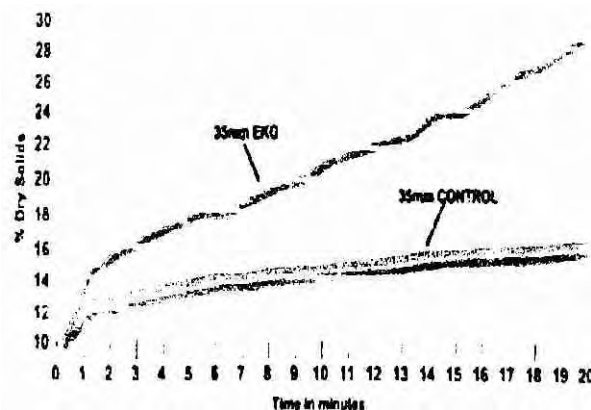


Figure 11' Use of EK to Increase rate of dewatering of hurnic sewage sludge over that achieved by hydraulic means alone (Control!).

114 Mineral Wastes

Treatment of water abstracted from rivers or aquifers results in the production of large quantities of mineral precipitates. Owing to their very fine grained nature, these precipitates are very difficult to filter and separate from water. Experimental work has shown that an initial solids content of 4.6 % (liquids sludge) can be improved to around 14% by a combination of electroosmosis and electrophoresis and optimized by the addition of a simple ionic electrolyte and mixing of the sludge.

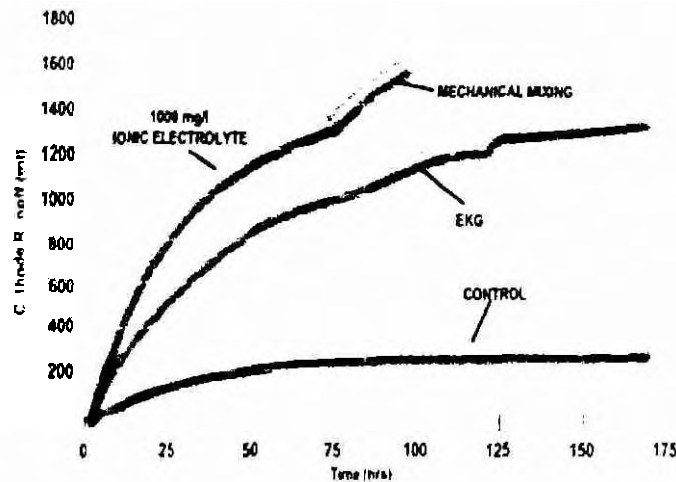


Figure 42: Dewatering alum sludge using electroosmosis

The above shows the effect of dewatering alum sludge using electroosmosis. Using EK produced significantly better dewatering than simple hydraulic methods and this was further enhanced using an electrolyte and mechanical mixing.

114.1 Mine Tailings

In the mining industry, the recovery of metals and minerals from rock often requires that the ore or host rock be crushed and ground down to a very fine texture in order to release the minerals being sought. The industry therefore produces huge quantities of fine grained mineral sludge or tailings. Large scale laboratory data illustrate the ability of elektrokinetik to induce settlement by a mixture of electrophoretic movement and pH related adjustment of colloid structure. In essence, anodes became coated in solids due to electrophoretic migration and when the pH reached a certain level the remaining suspension cleared rapidly. The photograph below shows a field trial underway to dewater thickened tailings pastes using electroosmosis.

DeBeers Diamond Mines in Kimberley, South Africa have used elektrokinetik to optimize their belt press dewatering. The mineralogy of the waste tested was a mixture of clays including montmorillonite and very finely divided quartz. The problem with these wastes is that the materials are so fine that there is effectively zero settlement of suspended particles even after several months. Diamond mine tailings can be very fine grained with >80% of the material being finer than 1 mm. The initial solids content of the slurries was approximately 1.3%. The use of electroosmosis method resulted in a very rapid settlement of the materials. The Results:

- Input 50% dry solids slimes
- Output 75% dry solids cake
- 49% (by volume) water recovery
- Stackable cake
- Transportable by conveyor
- 40-60% reduction in power consumption
- Significant reduction in carbon footprint

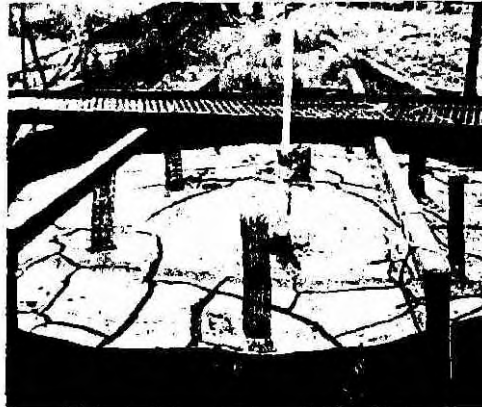


Figure 13: Field trial using electrokinetic prefabricated vertical drains to further dewater thickened mine tailings. The cathode is situated in the centre, surrounded by anodes.

The effect of **electroosmosis** or **electrophoresis** on sludge and tailings depends on their consistency. **Electrophoresis** works in liquid suspensions, such that solid particles move under the action of a DC voltage, aggregate and **settle out** from suspension. In some instances, there is a transition from **electrophoresis** to **electroosmosis** during treatment as the solids content rises and the material becomes less like a suspension and more like a soil. The **electroosmosis** method has been used to accelerate the settlement of solids from liquid suspensions and to increase the rate of consolidation of thickened tailings pastes.

III. Electrochemical Injection

III.1 Slope Stability of Embankment

Unstable embankments and cuttings represent a major problem for railway and highway authorities. In a majority of cases instability can be directly related to poorly draining materials within the earthwork structure. In Germany and UK rail industry, for example, the consequences of this instability are the imposition of significant speed restrictions throughout the network. It is accepted that climate change will greatly exacerbate these problems, therefore cost effective solutions are being sought. Electrochemical hardening (dewatering and electrochemical grouting) offers an innovative approach to this endemic problem by effecting rapid drainage and consolidation without the need for significant disruption to operations (Draganov, 1988).



Figure 14. Installation of Elektrokinetik Electrode on railway embankments

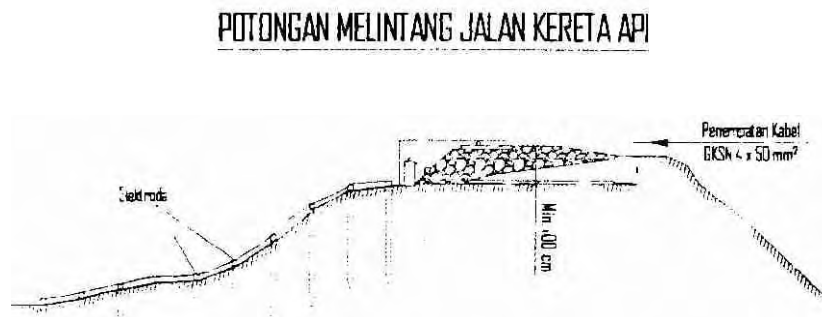


Figure 15. Schematic of electrode position to reinforcing of railway embankments (after Draganov, 1988)

1112 Soil Hardening underneath Foundation

Soil hardenings underneath foundation that break through cause of the building age and the environmental problem with electrochemical grouting have been done by some authors. Like soil improvement of embankment, application of this method are executed by injection of solution as cement material and pore water substitute. After finishing the electrochemical soil stabilization the bore hole of injection place where filled with fine binding cement.

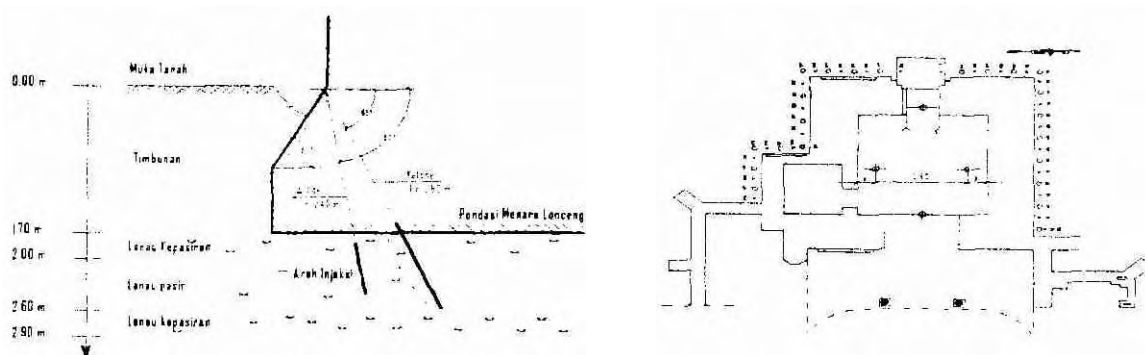


Fig 16. Schematic and distribution of electrode position to hardening of Soil underneath foundation (after Azzam, 1997)

III.3 Slope Stability of Landslide Zone

Longsoran adalah salah satu jenis bencana yang sering dijumpai di Indonesia, baik skala kecil maupun besar. Longsoran mudah terjadi pada tanah kohesif atau berbutir halus, dan pada saat jenuh air, karena pada saat tersebut nilai kuat geser dan kohesinya terendah. Sebagian besar longsoran (mass movement) di Indonesia terjadi pada musim hujan sebagai akibat masuknya air hujan pada tanah kohesif atau berbutir halus. Hal ini menyebabkan massa tanah bertambah, dan gaya geser antara masa tanah yang akan bergerak dengan lereng yang stabil semakin berkurang. Dimensi longsoran semacam ini umumnya tidak terlalu besar, dan sering terjadi pada alur sungai, sepanjang sungai dan pada timbunan tanah untuk jalan maupun tanggul.

Upaya penanggulangan longsoran biasanya dilakukan setelah terjadi, meskipun gejala longsoran dapat diketahui sebelum kejadian. Pada saat ini penanggulangan longsoran semacam ini dilakukan dengan membuat dinding penahan. Metode ini selain mahal, seringkali hanya bertahan dalam beberapa tahun dan tidak menyelesaikan masalah utamanya, yaitu tidak merubah sifat tanah kohesif yang memang mudah menyerap air.

Dalam bidang mekanika tanah perbaikan tanah kohesif dapat dilakukan dengan mencampur tanah dengan kapur tohor (Ca(OH)_2) atau dengan semen dalam perbandingan tertentu, sesuai dengan jenis tanah kohesifnya. Dalam pembuatan timbunan tanah untuk jalan atau tanggul, dapat dilakukan dengan menebarkan kapur tohor pada permukaan tanah setempat, kemudian dicampur dengan bantuan alat berat dan dipadatkan dengan steam wales. Pelaksanaan perbaikan tanah semacam ini tidak dapat dilakukan pada lereng atau bagian lereng yang berpotensi longsor, sehingga pembuatan dinding penahan merupakan cara yang paling populer. Metode lain yang saat

ini dikembangkan adalah dengan memasang geogrid atau geotekstil, atau kombinasi antara dinding penahan dan geotekstil. Ketiga metode ini sampai saat ini masih mahal. Penanaman pohon dengan akar tunjang juga sangat dimungkinkan, tetapi perlu waktu lama untuk tumbuh

Upaya pencegahan longsor dapat dilakukan dengan membangun dinding penahan atau dengan geotekstil, namun metode ini masih dianggap terlalu mahal. Untuk itu perlu dicari metode lain yang mudah dilakukan dan berbiaya rendah. Elektrochemical injection adalah metode penyemenan material berbutir halus dengan memanfaatkan fenomena elektroosmosis, yakni aliran zat yang dapat terpolarisasi sebagai akibat beda potensial, atau adanya arus listrik. Bedanya, metode ini memanfaatkan fenomena tersebut untuk mengalirkan cairan perekat (semen) agar tanah mempunyai kuat geser lebih tinggi. Metode ini telah dimanfaatkan oleh beberapa ahli geoteknik di Jerman untuk mempercepat proses konsolidasi tanah dan memperbaiki tanah di bawah pondasi akibat penurunan air tanah atau pelarutan, dan kemungkinan dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan stabilitas tanah agar potensi longsor berkurang (Gambar 16).

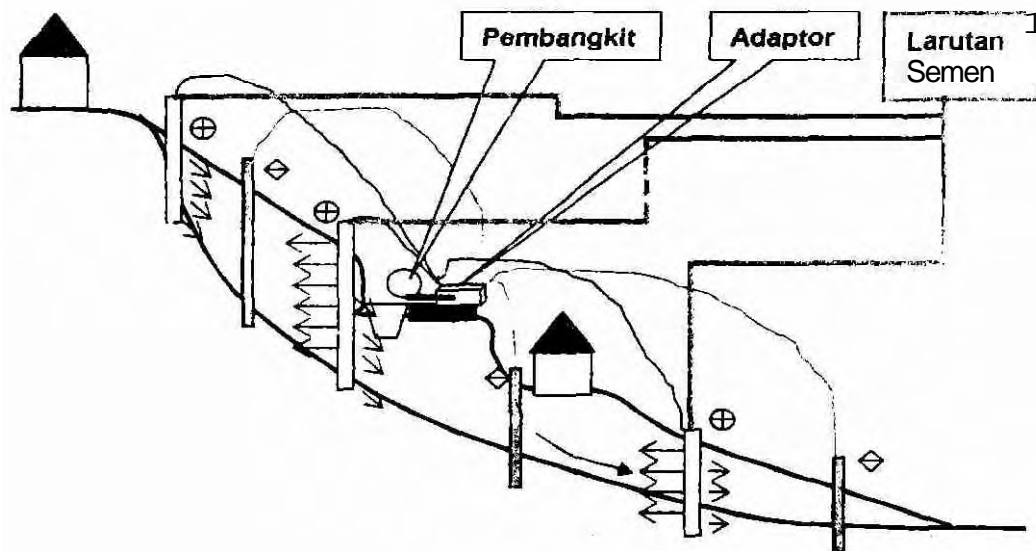


Figure 17: Model of soil hardening on the slope of landslide zone

IV. Remediation of Contaminated Soil

In the last two decades some author from different institutions developed the application of elektrokinetik phenomena to remediate contaminated soil by heavy metal and organic solution. This method can be executed in situ. The schematic of soil remediation by using of elctrokinetic phenomena can be seen below.

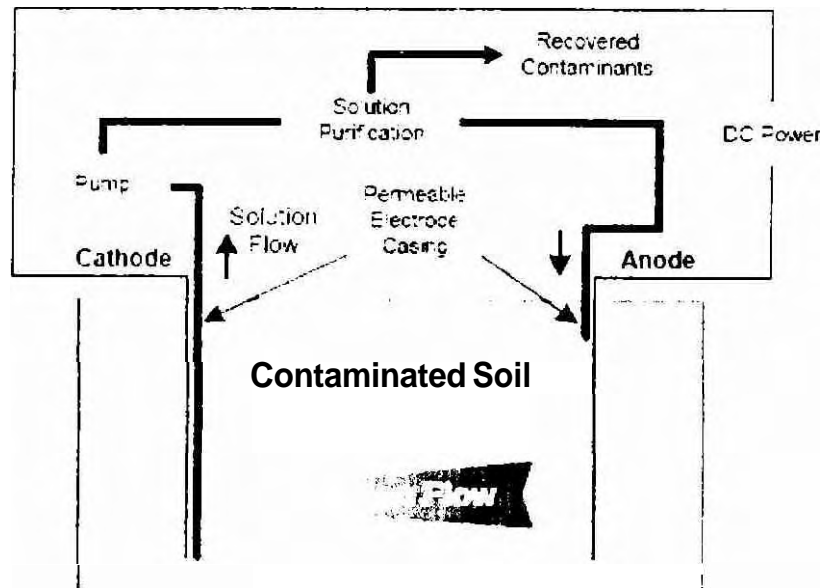


Fig 18 Schematic of in situ soil remediation by electrokenetik methode

IV.1 Heavy Metal

Remediation soil from the toxic elements, including the heavy metals are effected by the electrochemical methods in the most cases. However, in spite on available investigation the electrochemistry, most of the details are insufficiently analyzed. In particular, the most question of using different substans as energizer of electrochemical treatment are studied enough. The result of some researches with different heavy metal solution show conclusion:

- Organic substans and pH influence cn degree of electrokinetik removing heavy metal from clay soils
 - The degree of electrochemical remediation sandy soil was higher than clay soil, the explained his low adsorption properties
- The maximum degree of remediation was reached under high moister content

In some countries this method is conducted for detoxification of fly ashes from municipal solid waste incenaration (MSWI) MSWI contains high concentrations several heavy metals, anti due to the potential leaching of these heavy metals and other components. In many countries MSWI fly ashes are regulated as hazardous waste. Because of tho natural pH of MSWI fly ashes is very alkaline (around 12), and at this pH most heavy metals are

rather insoluble it is not feasible to use acid (the acidic front) for mobilisation the heavy metals at such high pH, so electrokinetic is combined with electrodialysis.

IV.2 Organic Compound and Petroleum

Bioremediation harnesses the degradative powers of bacteria to help remove a wide range organic and inorganic pollutants in soils. The use of biodegradation to remediate organic solution polluted sites has increased considerably the last decade, but the treatment can be limited by type and concentration of pollutant, and supply of water, oxygen and nutrients for microorganisms. Depending on the site and contaminant, either naturally occurring or inoculated microbes may be able to degrade the undesirable chemicals, especially with addition of nutrients or surfactants. The efficacy of the bioremediation can be limited by the problem of bioavailability chemicals can become adsorbed onto soil particles and trapped in very small pores where bacteria cannot access them. Electrokinetics might be efficient method to inject nutrients in to fine grained soil and this way increase the biodegradation rate.

The process of bioremediation may be enhanced by electrokinetics, as the phenomena involved lead to a range of forces on both pollutant and bacteria. This leads to relative motion by the two, and the increased contact that result will lead to increased degradation. The electric field may assist the desorption of contaminant molecules from the soil matter. and the electroosmotic flow moves them to where they may degraded, which therefore overcome the problems of bioavailability. Oxygen and heat, produced as a result of the electrolysis water, provide extra impetus to the action of bacteria – a temperature increase of a few degrees can increase degradation rates. and the presence of oxygen is necessary for aerobic degradation to occur.

V. Research and Development

V.1 On Going Research

The electrochemical stabilization processes are studied in a kaolin soil. A **series of** experiments are performed to study the effects of two chemical agents used in electrochemical stabilization tests. The strengthening effects of **electrokinetics** and electrochemical treatments on the kaolin soil are investigated first. Significant increases in the undrained shear strength and effective cohesion are obtained after all tests, and the most significant improvement is found **after** the electrochemical treatment using a 20% CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 0,1 N and Na_2CO_3 solution as the stabilization agent. Subsequently, an electrochemical test is carried out on the kaolin soil with an embedded steel plate to simulate a part of foundation. In this test, the practical considerations for later large-scale tests and ultimately for field implementation are taken into account in the design, including factors such as the attachment of electrodes to the foundation, injection of the stabilization agent via perforated pipe electrodes, and distributions of **voltage** and electrical current in the soil.

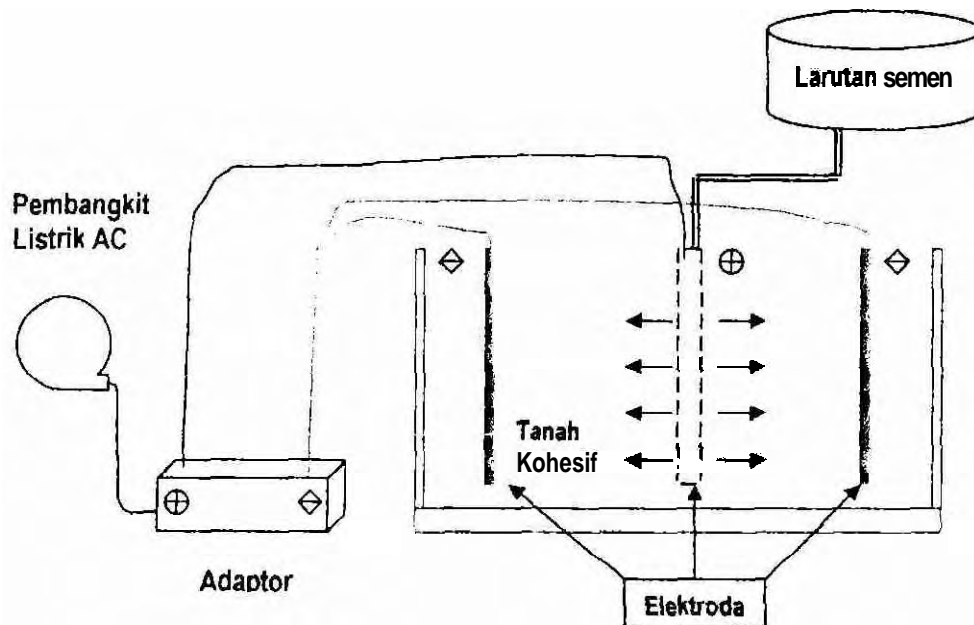


Fig 19. Laboratory model test of **electrochemical injection**

Untuk percobaan di laboratorium digunakan tanah lempung kaolin. Pengujian bahan sesuai dengan standard yang berlaku Variabel **bebas** dalam penelitian ini adalah **jenis** bahan pengikat atau **larutan** semen, dan **besarnya** arus yang **diperlukan** untuk **mentransportnya**, sedangkan variabel terikat adalah kuat geser tanah. Pengujian kuat geser tanah akan dilakukan dengan **uji triaxial** tidak terdrainase dan unconfined test sesuai standard yang berlaku. Rancangan perwbaan **disajikan** pada **tabel 1** berikut.

Untuk mengetahui hasil injeksi **elektrokimia** dilakukan dengan **pengambilan** contoh tidak terganggu, kemudian pengujian di laboratorium. Pengambilan dan **pengujian** sampel tanah dilakukan sesuai SNI. Hasil pengujian kuat geser sebelum dan sesudah dilakukan perbaikan dibandingkan untuk mengetahui keberhasilan dari **metode** ini.

Tabel 1; Rancangan percobaan

	1V/cm, tegangan semi tunak	1V/cm, tegangan tidak tunak
Ca(OH)_2 0,1 N	Kuat Geser A3	Kuat Geser A4
CaCl_2 20%	Kuat Geser B3	Kuat Geser B4
$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CaCl}_2$	Kuat Geser B3	Kuat Geser C4
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CaCl}_2$	Kuat Geser D3	Kuat Geser D4
PNS + CaCl_2	Kuat Geser E3	Kuat Geser E4

V.2 Result

The result of this test reveals a 100% increase in the steel plate axial load capacity after 7 days of treatment with an applied voltage of 1 V. The main features of the approach are that it generates virtually no disturbance to the soil and the treatment is targeted at the soil–structure interface. With further development, the electrochemical treatment may be applied in offshore engineering for stabilization of foundations installed in weak soils,

V 3 Next Research

Pemanfaatan fenomena **elektrokinetik** dalam bidang **geoengineenng** and **geoenvironmental** masih **menghadapi** beberapa **permasalahan** dan memerlukan pengkajian lebih mendalam. Permasalahan tersebut antara lain:

1. Proses oksidasi pada anode. Karena **aliran** elektron dari anoda ke katoda, maka pada dan sekitar **elktroda positif** terjadi proses oksidasi yang menyebabkan elektroda korosif. Beberapa perusahaan komersial **telah** mengembangkan elektroda yang tahan terhadap proses oksidasi dan **juga** berfungsi sebagai drainase. Untuk menghindari proses ini beberapa **lembaga** peneliti **seperti** Engineer of US ARMY mengembangkan dengan arus listrik AC.
2. Pembuatan Adaptor Untuk **aplikasi** di lapangan diperlukan adaptor yang mempunyai arus cukup **tigggg** dan **stabil** Permasalahan terutama dihadapi di negara berkembang, karena **bahan** pembuatan adaptor yang **balk** sulit diperoleh.
3. **Larutan** injeksi / grouting. Untuk **perkuatan** tanah dengan **cara injeksi** larutan diperlukan larutan yang **mampu berfungsi** sebagai semen dan rarnah lingkungan. Setiap jenis tanah membutuhkan larutan dengan **berbagai macam** konsentrasi agar pelaksanaan di lapangan lebih efisien dan **efektif**. Pemanfaatan polimer yang dapat **terpolarisasi** menjadi tantangan tersendiri

Penelitian **tentang** pemanfaatan fenomena elektrokinetaik, khususnya **elektroosmosis** dalam rangka pencucian tanah **tercemar**, baik oleh **logam berat** maupun bahan organik berbahaya sedang giat dilakukan oleh peneliti di berbagai negara **maju**. Tidak ada salahnya peneliti dari negara **berkembang** memulai penelitian serupa.

Literature

- Azzam, R., Tondera, D., Hoepfner, S.**, 1997, *Elektrochemische Bodenverfestigung des Baugrunds der St Nikolauskirche in Walbeck-Geldern*, *Geotechnik* Vol. 20. No.3, p. 204 – 214.
- Draganov, L., et. al.**, 1988, *Erfolgreiche elektrochemische Verfestigung von Boden im Gleisbett von Eisenbahnlinien*, in *Freiberger Forschungshette, Spezialverfahren im Bergbau und Bauwesen*, A771. .
- Gallagher, P. M., et. al.**, 2007, *Full-Scale Field Testing of Colloidal Silica Grouting for Mitigation Liquefaction Risk*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 133 No.2 ,p. 186 – 196, ASCE
- Gregolec, G.**, 2008, *Fundamental Aspects of Using Electrical Fences for Groundwater Remediation*, Dissertation on University **Karlsruhe**, Germany
- Hartien, J. & Viberg, L.**, 1998, *General Report : Evaluation of Landslide Hazard*. in *Proceeding of International Association of Engineering Geologist Annual Meeting*, Athens
- Mitchell, J K.**, 1993, *Fundamental of Soil Behavior*, 2nd edition. John Willey Scientific, Toronto
- Rachmasyah, A.**, 2002, *Soil Improvement with Elektroosmosis Mefhode*, Research Report, Toray Foundation, Unpublished
- Rachmasyah, A.**, 2006, *Pengaruh Kadar Air pada Saat Pernadatan terhadap Kuat Geser Tanah Lempung Kaolin*, *Jurnal Teknik Edisi Agustus* 2006
- Rachmansya, A.**, 2008, *Pemetaan Potensi Bencana di Kecamatan Gedangan dan Bantur Kabupaten Malang*, Dinas Energi dan Sumberdaya Mineral Kabupaten Malang, tidak dipublikasikan.
- Sachan, A & Penumadu, D.**, *Effect of Microfabric on Shear Behavior of Kaolin Clay*, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* Vol. 133 No.3 ,p. 306 – 318, ASCE
- Oey, W & Azzam, R.**, 1999, *Einfluss des pH-Werts im Boden auf das Zeta Potential und dessen Zusammenhang mit dem elektroosmotischen Durchlassigkeitswert (k_e)*, *Geotechnik* Vol. 22 No. 3, p. 192 – 200, Deutschen Gesellschaft fuer Geotechnik.
- Zorn, R.**, 2007, *Numerische Modellierung des Stofftransportes unter Einfluss eines elektrischen Gradienten*, Dissertation an der Universitaet Karlsruhe, Deutschland

1000458